

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE MATERIAIS  
NÚCLEO DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICOS

LUIS MIGUEL MARCOS ROSAS

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO LÍQUIDO-SÓLIDO-  
GÁS NO PADRÃO GOLFADAS EM UM DUTO HORIZONTAL**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2016

LUIS MIGUEL MARCOS ROSAS

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO LÍQUIDO-SÓLIDO-  
GÁS NO PADRÃO GOLFADAS EM UM DUTO HORIZONTAL**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Área de Concentração em Engenharia Térmica, do Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus de Curitiba-CT, UTFPR.

Orientador: Prof. Moises Alves Marcelino Neto, Dr.

Co-orientador: Prof. Rigoberto E. M. Morales. Dr.

CURITIBA

2016

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**

---

M321a Marcos Rosas, Luis Miguel  
2016 Análise experimental do escoamento líquido-sólido-gás  
no padrão golfadas em dutos horizontais / Luis Miguel  
Marcos Rosas.-- 2016.  
100 p.: 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, 2016.  
Bibliografia: p. 87-91.

1. Engenharia mecânica - Dissertações. 2. Escoamento  
multifásico. 3. Escoamento em golfadas. 4. Hidratos.  
I.Marcelino Neto, Moisés A.. II.Melgarejo Morales,  
Rigoberto Eleazar. III.Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica e de Materiais. IV. Título.

CDD: Ed. 22 -- 620.1

---

**Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba**

---

**TERMO DE APROVAÇÃO**

LUIS MIGUEL MARCOS ROSAS

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO LÍQUIDO-SÓLIDO-GÁS NO  
PADRÃO GOLFADAS EM DUTOS HORIZONTAIS**

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 César Borges, Dr.  
Coordenador do Programa

**Banca Examinadora**

---

Prof. Moisés A. Marcelino Neto, Dr.  
UTFPR - orientador

---

Prof. Erick de Moraes Franklin, Dr.  
UNICAMP

---

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

---

Prof. Paulo H. Dias dos Santos, Dr.  
UTFPR

Curitiba, 04 de Outubro de 2016

A minha mãe, exemplo de luta e coragem e por me dar a força em momentos difíceis de minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por ser essencial em minha vida, meu guia, socorro presente na hora da angústia.

A os meus familiares e em especial a minha mãe Benedicta, por sempre acreditar em mim, por me inculcar valores e princípios e por sua luta continua para que eu me possa superar.

Ao meu orientador, professor Moisés, pela oportunidade e confiança para a realização deste trabalho. Ao meu co-orientador, professor Rigoberto, pelos conhecimentos transmitidos, que são a base desta dissertação.

Ao professor Schaneider e Reinaldo, pela ajuda e tempo dedicado no desenvolvimento da bancada experimental.

Aos meus colegas do NUEM e em especial a Carlos Bassani, Rafael Alves, e Felipe Ancajima pela colaboração na elaboração do presente trabalho, pelas dicas e valiosas sugestões em vários pontos chaves do conteúdo deste trabalho.

Aos meus amigos Renzo, Hans, Jhoan, Fernando, Romulo, Vinicius e Holmes, pela amizade e conselhos nos momentos ruins e bons e por me proporcionar um momento agradável em minha estadia no Brasil.

Finalmente à UTFPR, NUEM e Petrobras pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa.

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”.

John F. Kennedy

## RESUMO

MARCOS ROSAS, Luis Miguel. *Análise Experimental do escoamento Líquido-Sólido-Gás no Padrão Golfadas em dutos Horizontais*. Dissertação de Mestrado, Núcleo de Escoamentos Multifásicos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

**Resumo.** Diversas aplicações industriais envolvem escoamentos multifásicos, como é o caso das operações de produção de petróleo em águas profundas, onde partículas sólidas, como areia ou hidratos, podem estar presentes, dando origem ao escoamento sólido-líquido-gás. O escoamento no padrão golfadas é frequentemente encontrado em linhas de produção de petróleo provocado pela topografia do terreno. É de grande valia para a indústria, a compreensão da 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. Nesse contexto, o presente trabalho experimental caracteriza o escoamento de três fases, gás-sólido-líquido em um tubo horizontal, visando determinar o impacto das partículas sólidas sintéticas (similares aos hidratos de gás) sobre os parâmetros característicos do escoamento em golfadas (velocidade da frente da bolha, frequência de passagem da célula unitária, comprimento da bolha e do pistão). Os testes experimentais foram realizados utilizando partículas sólidas, com massa específica semelhante às partículas de hidratos de gás, dispersas na fase líquida. Partículas sintéticas modelo de polietileno de 0,5 mm de diâmetro e  $938 \text{ kg/m}^3$  de massa específica foram utilizadas como a fase sólida. Água e ar comprimido foram utilizados como fase líquida e gasosa, respectivamente. A seção de testes compreende uma tubulação de 26 mm de diâmetro interno e 9 m de comprimento. As estruturas do escoamento foram monitoradas por meio de sensores resistivos e uma câmara de alta velocidade. Diversas combinações de velocidades superficiais de líquido e gás, que garantam o padrão intermitente em golfadas, e diferentes concentrações de partículas foram aplicadas nos testes. Os sinais obtidos foram processados e apresentados através de funções densidade de probabilidade (PDF) e valores médios. Estes valores obtidos foram discutidos e comparados com o escoamento bifásico em golfadas líquido-gás para condições semelhantes. Pôde ser observado que as partículas sólidas influenciam positivamente na velocidade da frente da bolha e a frequência, e influenciam negativamente nos comprimentos do pistão e da bolha.

**Palavras-chave:** Escoamento multifásico, escoamento sólido-líquido-gás, golfadas, hidratos.

## ABSTRACT

MARCOS ROSAS, Luis Miguel. *Experimental Analysis of Liquid-Solid-Gas Slug Flow in Horizontal Pipeline*. Master Thesis, Multiphase Flow Research Center, Federal University of Technology – Paraná, Curitiba, Brazil, 2016.

**Abstract.** Multiphase flows appear during a large number of industrial operations, as in the case of oil and gas offshore production operations, where solid particles, such as sand and hydrates may occasionally be present in the flow, starting the solid-liquid-gas flow. Slug flow in ducts 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. Understanding the hydrodynamics of the slug flow is significant in the design of crude oil production lines as well as in the project of equipment involved in oil and gas operations. The present work experimentally characterizes the gas-liquid-solid three-phase flows in a horizontal pipe. The objective here is to determine the role played by solid particles (similar to hydrates) on the characteristic parameters of slug flows, namely the bubble front velocity, unit cell frequency and bubble and liquid slug lengths. Experimental tests with solid particles (whose specific mass are similar to those of the hydrate particles) dispersed in the liquid were carried out. The test section comprised a 26 mm ID, 9 m long transparent acrylic pipe. The flow structures were monitored and measured by means of resistive sensors and a high-speed camera. Several pairs of gas and liquid superficial velocities, for which the slug flow regime was observed, at different solid particle concentration were investigated during the tests. Synthetic standard 0.5 mm diameter polyethylene particles with  $938 \text{ kg/m}^3$  density constituted the solid phase. Water and compressed air were used as the liquid and gas phase, respectively. The signals captured during the tests were processed and presented in terms of a probability density function (PDF) and averaged values. The experiments and their results are discussed and compared to the two-phase gas-liquid flows at similar conditions. It was observed that solid particles influence positively the bubble front velocity and frequency, and influence negatively the piston and bubble lengths.

**Keywords:** Multiphase flow, solid-liquid-gas flow, slug flow, hydrates.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Padrões de escoamento bifásico líquido-gás em tubulações horizontais: a) estratificado, b) golfadas, c) bolhas dispersas e d) anular. ....	19
Figura 1.2 - Tipos de estruturas dos hidratos. ....	21
Figura 2.1 - Definição de célula unitária do escoamento em golfadas, conforme proposto por Wallis (1969). ....	25
Figura 2.2 - Representação esquemática do modelo de duas camadas para escoamento sólido-líquido de Doron et al. (1987). ....	28
Figura 2.3 - Representação esquemática do modelo de três camadas para escoamento sólido-líquido. ....	29
Figura 2.4 - Mapa de fluxo de escoamento sólido-líquido em dutos horizontais. ....	30
Figura 2.5 - Representação do escoamento em golfadas e da frente do pistão inativa. ....	32
Figura 2.6 - a) Evolução da formação da duna de areia para escoamento monofásico. b) Evolução da formação da duna de areia para escoamento líquido-gás em golfadas. ....	33
Figura 3.1 - Bancada experimental. ....	40
Figura 3.2 - a) Imagem do tanque com o misturador de partículas e b) desenho esquemático do funcionamento do misturador de partículas. ....	41
Figura 3.3 - Esquema representativo do sensor resistivo. ....	44
Figura 3.4 - Arranjo dos sensores resistivos para a medição da velocidade de translação da bolha alongada. ....	44
Figura 3.5 - Diagrama esquemático do circuito eletrônico. ....	45
Figura 3.6 - Arranjo da câmera e iluminação para captura de imagens do escoamento. ....	46
Figura 3.7 - Posicionamento das estações de medição. ....	46
Figura 3.8 - Seção transversal do tubo na região da bolha alongada. ....	49
Figura 3.9 - Série temporal da fração de gás para o escoamento em golfadas. ....	50
Figura 3.10 - Série temporal binarizada. ....	51

Figura 3.11 - Comparativo entre a função densidade <i>Kernel</i> e o histograma. ....	53
Figura 3.12 - Diagrama de caixas. ....	54
Figura 4.1 - Grade de testes no mapa de fluxo proposto por Taitel e Dukler (1976) para dutos horizontais. ....	56
Figura 4.2 - Função densidade de probabilidade da fração de vazio da bolha ( $R_{GB}$ ) para a estação 3 do ponto P04 para as três concentrações. a) 0 g/dm <sup>3</sup> -água, b) 6 g/dm <sup>3</sup> -água, c) 8 g/dm <sup>3</sup> -água. ....	57
Figura 4.3 - Diagrama de caixa da fração de vazio para a estação 3 do ponto P04 para as três concentrações. a) 0 g/dm <sup>3</sup> -água, b) 6 g/dm <sup>3</sup> -água, c) 8 g/dm <sup>3</sup> -água. ....	58
Figura 4.4 - Imagens do escoamento em golfadas para o ponto P05 na estação 2, analisadas para as três concentrações. a) 0 g/dm <sup>3</sup> , b) 6 g/dm <sup>3</sup> e c) 8 g/dm <sup>3</sup> . ....	61
Figura 4.5 - Imagens capturadas pela câmera de alta velocidade para o ponto P05 ( $J_G = 1$ m/s e $J_L = 0,5$ m/s) para concentrações de partícula: a) 0 g/dm <sup>3</sup> , b) 6 g/dm <sup>3</sup> e c) 8 g/dm <sup>3</sup> . ....	64
Figura 4.6 - Caminho percorrido da bolha que não coalesceu. ....	66
Figura 4.7 - Função Densidade de Probabilidade da velocidade da frente da bolha na estação 2 para os pontos P04 e P05 nas concentrações de 0 g/dm <sup>3</sup> -água, 6 g/dm <sup>3</sup> -água, 8 g/dm <sup>3</sup> -água. ....	67
Figura 4.8 - Valores médios da velocidade da frente da bolha na estação 2 para os pontos P04 e P05 nas três concentrações de partículas. ....	68
Figura 4.9 - Comparação dos ajustes da velocidade da frente da bolha para diferentes concentrações de partículas. ....	70
Figura 4.10 - Comparação entre a velocidade da frente da bolha estimada pela correlação e os dados experimentais, para as três concentrações de partículas. ....	70
Figura 4.11 - Função Densidade de Probabilidade da frequência do escoamento em golfadas na estação 2 para os pontos P04 e P05 nas concentrações de 0 g/dm <sup>3</sup> -água, 6 g/dm <sup>3</sup> -água, 8 g/dm <sup>3</sup> -água. ....	71
Figura 4.12 – Valores médios da frequência de passagem da célula unitária na estação 2 para os pontos P04 e P05 nas três concentrações de partículas. ....	72

Figura 4.13 - Comparação dos ajustes do número de Strouhal para diferentes concentrações de partículas.....	73
Figura 4.14 - Comparação entre a frequência estimada pela correlação e os dados experimentais, para as três concentrações de partículas.....	74
Figura 4.15 - Função Densidade de Probabilidade do comprimento da bolha na estação 2 para os pontos P04 e P05 nas concentrações de 0 g/dm <sup>3</sup> -água, 6 g/dm <sup>3</sup> -água, 8 g/dm <sup>3</sup> -água..	75
Figura 4.16 - Valores médios do comprimento da bolha na estação 2 para os pontos P04 e P05 nas três concentrações de partículas. ....	75
Figura 4.17 - Comparação dos ajustes para o comprimento da bolha para diferentes concentrações de partículas. ....	77
Figura 4.18 - Comparação de valores de comprimento da bolha de correlação e experimentais para as três concentrações.....	77
Figura 4.19 - Função Densidade de Probabilidade do comprimento do pistão na estação 2 para os pontos P04 e P05 nas concentrações de 0 g/dm <sup>3</sup> -água, 6 g/dm <sup>3</sup> -água, 8 g/dm <sup>3</sup> -água..	78
Figura 4.20 - Valores médios do comprimento do pistão na estação 2 para os pontos P04 e P05 nas três concentrações de partículas.....	79
Figura 4.21 – Comparação dos ajustes do comprimento do pistão para diferentes concentrações de partículas. ....	80
Figura 4.22 - Comparação de valores de comprimento de pistão calculada pela correlação e os dados experimentais para as três concentrações de partículas. ....	81
Figura 4.23 - Parâmetros característicos das golfadas para o ponto P04 ao longo da tubulação nas três concentrações de partículas. ....	83
Figura 4.24 - Parâmetros característicos das golfadas para o ponto P05 ao longo da tubulação nas três concentrações de partículas. ....	84
Figura 4.25 - Valores médios dos parâmetros das golfadas ao longo da tubulação para o ponto P04 nas três concentrações de partículas.....	85
Figura 4.26 - Valores médios dos parâmetros das golfadas ao longo da tubulação para o ponto P05 nas três concentrações de partículas.....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Descrição técnica dos equipamentos utilizados na linha sólido-líquido. ....	42
Tabela 3.2 - Características técnicas dos sensores de pressão.....	43
Tabela 4.1 - Grade de testes.....	56
Tabela 4.2 - Valores médios da velocidade da frente da bolha para as três concentrações de partículas na estação 2. ....	68
Tabela 4.3 - Coeficientes do ajuste linear para a velocidade da frente da bolha.....	69
Tabela 4.4 - Valores médios da frequência de passagem da célula unitária para as três concentrações de partículas na estação 2.....	72
Tabela 4.5 - Coeficientes do ajuste exponencial para o número de Strouhal.....	73
Tabela 4.6 - Valores médios do comprimento da bolha para as três concentrações de partículas na estação 2.....	76
Tabela 4.7 - Coeficientes do ajuste exponencial para o comprimento da bolha. ....	76
Tabela 4.8 - Valores médios do comprimento do pistão para as três concentrações de partículas na estação 2. ....	79
Tabela 4.9 - Coeficientes do ajuste exponencial para o comprimento do pistão.....	80
Tabela A.1 - Valores médios dos parâmetros característicos da golfada analisadas para as três concentrações ao longo da tubulação. ....	94
Tabela C.1 – Incertezas relativas dos instrumentos utilizados .....	100
Tabela C.2 Incertezas relativas das variáveis experimentais.....	101

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras romanas

$A$	Área da seção transversal do tubo	$[m^2]$
$C_0$	Parâmetro de distribuição	$[-]$
$C_\infty$	Parâmetro de deslizamento	$[-]$
$D$	Diâmetro da tubulação	$[m]$
$d_s$	Distância entre sensores resistivos	$[m]$
$Eo$	Número de Eötvös	$[-]$
$f$	Frequência da célula unitária	$[Hz]$
$Fr$	Número de Froude	$[-]$
$St$	Número de Strouhal	$[-]$
$g$	Aceleração da gravidade	$[m.s^{-2}]$
$h_{LB}$	Altura do filme líquido	$[m]$
$J$	Velocidade da mistura	$[m.s^{-1}]$
$J_G$	Velocidade superficial de gás	$[m.s^{-1}]$
$J_L$	Velocidade superficial de líquido	$[m.s^{-1}]$
$J_{S'}$	Velocidade superficial do sólido	$[m.s^{-1}]$
$L$	Comprimento	$[m]$
$P$	Pressão	$[Pa]$
$\dot{Q}$	Vazão volumétrica	$[m^3.s^{-1}]$
$R^2$	Coefficiente de determinação	$[-]$
$Re$	Número de Reynolds	$[-]$
$U$	Velocidade	$[m.s^{-1}]$
$T$	Tempo	$[s]$
$V_D$	Velocidade de deslizamento	$[m.s^{-1}]$
$V$	Tensão elétrica	$[V]$
$Q_1, Q_3$	Quartis 1 e 3	$[-]$

$R_{S/L}$	Fração volumétrica do solido dentro do líquido	[-]
$z$	Coordenada axial da tubulação	[m]
$S$	Perímetro molhado	[m]
$R$	Fração de fase	[-]
$\Delta T_B$	Tempo de detecção da bolha pelos dois sensores	[s]

### Letras Gregas

$\rho$	Massa específica	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\theta$	Inclinação	[rad]
$\sigma$	Tensão superficial	[Pa]
$\tau$	Tensão de cisalhamento	[Pa]
$\mu$	Viscosidade dinâmica	[Pa.s]

### Índices

$B$	Bolha
$G$	Gás
$J$	Mistura
$L$	Líquido
$S$	Pistão/Solido
$GB$	Gás na região da bolha alongada
$LB$	Líquido na região da bolha alongada
$LS$	Líquido na região do pistão
$i$	Interface
$S'$	Sólido
$TB$	Translação da bolha
$V$	Vazio
$C$	Completamente de líquido
$J$	Mistura
$T$	Translação da célula unitária
$(\bullet)_L$	Referente à dispersão

**Siglas**

NUEM	Núcleo de Escoamentos Multifásicos
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
PDF	Função Densidade de Probabilidade
FC	Fator de corte
PIV	Velocimetria por Imagem de Partículas (do inglês, <i>Particle Image Velocimetry</i> )
PCI	Placa de Circuito Impresso

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1 Objetivos	21
1.2 Justificativa	22
1.3 Estrutura do trabalho	23
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>24</b>
2.1 Escoamento multifásicos	24
2.1.1 Escoamento em golfadas	24
2.1.2 Transporte de sólidos	27
2.1.3 A influência do escoamento em golfadas no transporte de sólidos	30
2.2 Parâmetros característicos do escoamento em golfadas	33
2.2.1 Velocidade de translação da bolha alongada	35
2.2.2 Frequência de passagem da célula unitária	36
2.2.3 Comprimento do pistão	37
2.3 Considerações finais	38
<b>3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b>	<b>39</b>
3.1 Circuito experimental	39
3.1.1 Linha sólido-líquido	40
3.1.2 Linha de gás	42
3.1.3 Linha trifásica sólido-líquido-gás	42
3.1.4 Sensores resistivos	43
3.1.5 Câmera de alta taxa de aquisição de dados	45
3.1.6 Estações de medição	46
3.1.7 Sistema de aquisição de dados	47
3.2 Procedimentos de medição	47
3.2.1 Procedimento para escoamento líquido-gás	47
3.2.2 Procedimento para escoamento sólido-líquido-gás	48
3.3 Processamento dos Sinais	49
3.3.1 Tratamento da série temporal	50
3.3.2 Cálculo dos parâmetros característicos das golfadas	50
3.4 Análise estatística dos parâmetros	52
3.4.1 Função Densidade de Probabilidade	52
3.4.2 Diagrama de Caixas	53
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>55</b>
4.1 Definição da grade de testes	55
4.2 Repetitividade das medidas	56

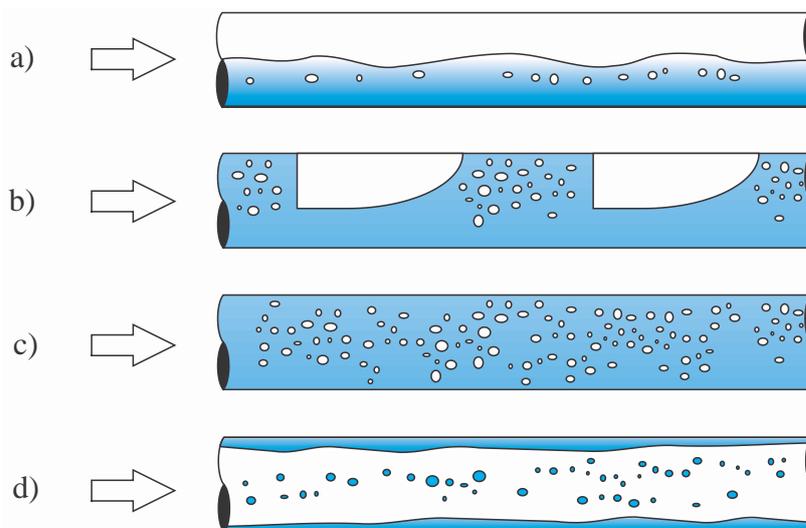
4.3	Visualização do escoamento em golfadas	59
4.4	Análise dos parâmetros característicos das golfadas	66
4.4.1	Velocidade da frente da bolha	66
4.4.2	Frequência da passagem da célula unitária	70
4.4.3	Comprimento da bolha	74
4.4.4	Comprimento do pistão	78
4.5	Evolução dos parâmetros das golfadas ao longo da tubulação	81
5	CONCLUSÕES	86
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	87
6	REFERÊNCIAS	88
APÊNDICE A - VALORES MÉDIOS DOS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DA GOLFADA		93
APÊNDICE B – CÁLCULO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAIS DO GÁS E DO LÍQUIDO.		95
B.1	VELOCIDADE SUPERFICIAL DO LÍQUIDO	95
B.2	VELOCIDADE SUPERFICIAL DO GÁS	96
APÊNDICE C – ANÁLISE DAS INCERTEZAS EXPERIMENTAIS		99

# 1 INTRODUÇÃO

Escoamentos multifásicos são caracterizados pelo fluxo simultâneo de mais de uma fase, podendo ser compostos por diferentes substâncias imiscíveis entre si ou por uma mesma substância em fases distintas. Esse tipo de escoamento pode ser encontrado em diversas aplicações industriais, como por exemplo, na produção e transporte de petróleo, operação de reatores nucleares, evaporadores, condensadores, plantas de destilação e caldeiras. O entendimento da dinâmica do escoamento simultâneo de mais de uma fase é de fundamental importância para o aprimoramento dos processos e dimensionamento de equipamentos que operam com esse tipo de escoamento.

Os escoamentos multifásicos podem ser formados por gás-líquido, líquido-líquido, líquido-sólido, gás-líquido-sólido, entre outros. Dependendo da vazão de cada uma das fases, das propriedades físico-químicas dos componentes, das características da tubulação e das condições de pressão e temperatura, as fases podem adquirir diferentes configurações ou distribuições espaciais, comumente denominadas padrões de escoamento.

Diversos autores como Barnea et al. (1982), Taitel e Dukler (1976), Shoham (1982), Doron e Barnea (1995), focaram seus esforços em identificar os padrões de escoamento existentes. Um caso particular de padrões para escoamento bifásico líquido-gás em tubulações horizontais é mostrado na Figura 1.1 (SHOHAM, 1982), onde podem ser identificados os padrões: estratificado, golfadas (*slug flow*), bolhas dispersas e anular.



**Figura 1.1 - Padrões de escoamento bifásico líquido-gás em tubulações horizontais: a) estratificado, b) golfadas, c) bolhas dispersas e d) anular.**

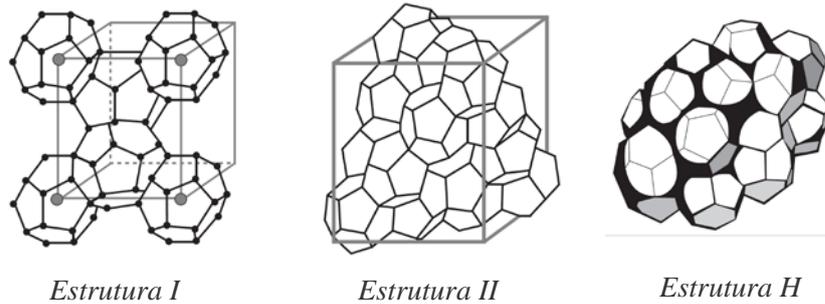
**Fonte: adaptado do Shoham (1982).**

Dos padrões de escoamento mostrados na Figura 1.1, o padrão de escoamento em golfadas é o mais comum em diversas aplicações, principalmente em operações de produção de petróleo e gás em águas profundas. Isto porque este padrão de escoamento cobre uma ampla faixa de velocidades superficiais de líquido e gás nas regiões usuais de operação, usualmente com velocidades de mistura entre 2 a 3 m/s. O escoamento bifásico intermitente no padrão golfadas é caracterizado pela sucessão alternada de duas regiões: o pistão de líquido e a bolha alongada. No escoamento horizontal, o pistão é uma região de líquido que pode conter pequenas bolhas dispersas em seu interior, enquanto a bolha alongada é uma região com uma grande quantidade de gás disposta sobre uma quantidade de líquido de forma estratificada.

Recentemente, foi identificada a necessidade de avaliar a interferência de partículas sólidas no desenvolvimento do escoamento bifásico de líquido-gás em golfadas (principalmente, nos parâmetros característicos desse escoamento, como velocidade da frente da bolha, frequência de passagem da célula unitária, comprimento da bolha e do pistão), pois se verificou que essas partículas presentes no escoamento podem ocasionar consideráveis quedas de pressão e criar um ambiente propício para a corrosão eletroquímica nos dutos (STEVENSON e THORPE, 2003).

Em operações de produção de petróleo, é comum encontrar ao longo do escoamento, partículas de sólidos puros (como gelo e dióxido de carbono sólido), parafinas, compostos asfálticos, partículas sólidas de areia e de hidratos.

Especificamente, no que se refere aos hidratos, esses são estruturas sólidas cristalinas que se formam quando a água, através de forças de ligação (ligação de hidrogênio), engloba pequenas moléculas de gás (metano, por exemplo), o que normalmente ocorre em condições de alta pressão e baixa temperatura. Dependendo de alguns parâmetros da molécula englobada, principalmente o tamanho, a estrutura cristalina conforma-se em uma das três formas possíveis, chamadas estruturas I, II e H, mostradas na Figura 1.2. Essas estruturas são formadas por cinco poliedros constituídos por moléculas de água conectadas através de ligações de hidrogênio, formando cavidades (hospedeiras). Essas cavidades são estabilizadas quimicamente pela presença das moléculas de gás (hóspedes) (SLOAN e KOH, 2008).



**Figura 1.2 - Tipos de estruturas dos hidratos.**  
**Fonte: adaptado de Koh et al. (2011).**

A literatura disponível sobre o escoamento simultâneo de sólido-líquido-gás não apresenta informação sobre a influência das partículas de hidrato no escoamento. Os trabalhos existentes avaliam a influência do escoamento líquido-gás em golfadas no transporte de partículas, que geralmente são de areia. Assim, torna-se propício e desejável o estudo da influência das partículas (tamanho e concentração), com massa específica similar ao hidrato, nos parâmetros característicos do escoamento bifásico líquido-gás no padrão em golfadas.

Cabe ressaltar que o presente trabalho está restrito ao estudo do escoamento em uma mistura de água, ar e sólido. Os esforços estarão concentrados na avaliação da influência das partículas sólidas sobre as estruturas características do escoamento intermitente de água-ar no padrão golfadas.

## 1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é estudar o escoamento trifásico de sólido-água-ar em uma tubulação horizontal utilizando partículas com massa específica e dimensões similares às do hidrato. A influência da concentração das partículas será quantificada nos seguintes parâmetros característicos do escoamento em golfadas: comprimento do pistão de líquido ( $L_S$ ), comprimento da bolha alongada ( $L_B$ ), velocidade da bolha alongada ( $U_{TB}$ ) e frequência de passagem da célula unitária ( $f$ ).

Para atingir o objetivo proposto, o circuito experimental existente no NUEM/UTFPR foi adaptado para a inserção de partículas sólidas com massa específica similar do hidrato. A monitoração das fases será realizada utilizando três sensores resistivos e uma câmera de alta taxa de aquisição de imagens dispostos ao longo de uma tubulação.

As análises serão realizadas e apresentadas através de Funções Densidade de Probabilidade (PDF) e de seus valores médios.

## 1.2 Justificativa

Escoamentos multifásicos de sólido-líquido-gás no padrão golfadas ocorrem em diversas atividades industriais, com especial destaque para a indústria do petróleo onde esse tipo de escoamento é encontrado com grande frequência. Dessa forma, compreender o mecanismo de transporte de sólidos no escoamento multifásico líquido-gás tem relevância direta no projeto das linhas de produção e transporte de petróleo e gás.

O aumento da quantidade de partículas em dutos horizontais pode produzir um depósito estacionário. A formação de um leito de partículas no interior do duto durante o processo de extração origina uma queda de pressão e afeta a taxa de produção, levando a diversos desafios de engenharia.

A maioria dos estudos publicados sobre o escoamento multifásico em tubulações focaram na dinâmica de duas fases de líquido-gás ou de líquido-sólido. Escassos estudos existem sobre o transporte simultâneo de três fases com partículas sólidas no escoamento de gás-líquido em dutos horizontais. Os trabalhos existentes avaliam a influência do escoamento intermitente em golfadas sobre o transporte de partículas, mas até o presente momento ainda não foi estudado o inverso, ou seja, a influência das partículas sobre o escoamento em golfadas, quando essas partículas encontram-se dispersas na fase líquida.

Os estudos multifásicos realizados até agora consideram a areia como partícula sólida, não tendo sido encontrado estudos com partículas sólidas que simulem o comportamento de hidratos. Dessa maneira, a correta análise deste tipo de escoamento no padrão golfadas torna-se uma necessidade na indústria do petróleo, propiciando um bom entendimento dos fenômenos que devem ser considerados no correto dimensionamento de equipamentos e tubulações.

Finalmente, o desenvolvimento do presente trabalho enfoca uma linha de pesquisa nova que pode servir como referência para outros estudos que analisam a influência das partículas sobre o escoamento multifásico, tanto para tubulações horizontais, quanto para tubulações inclinadas ou verticais, assim como para estudos com outros fluidos ou diferentes diâmetros de tubulação, com potencial para auxiliar pesquisas mais complexas do que a apresentada.

### 1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho experimental é dividido em seis capítulos. O ‘Capítulo 1 – Introdução’ define o tema e os objetivos do trabalho, justificando o porquê de sua escolha e ainda introduzindo conceitos básicos a serem considerados antes de abordar o problema com maiores pormenores.

O Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica apresenta uma revisão dos estudos realizados sobre escoamentos em golfadas, com e sem a presença de partículas sólidas, que serviram de base para a realização deste trabalho, abordando os diferentes estudos de escoamentos multifásicos existentes na literatura. Posteriormente é realizada uma revisão dos principais trabalhos que apresentam modelos e correlações que caracterizam o escoamento em golfadas em dutos horizontais.

O Capítulo 3 – Metodologia Experimental apresenta a metodologia utilizada para atingir os objetivos propostos no seguinte trabalho experimental. São descritos a bancada experimental, o funcionamento dos sensores resistivos e a câmera de alta velocidade. A seguir, são mostradas as estações de medição, o sistema de aquisição de dados e o procedimento de medição. Ao final, é apresentado a metodologia para o processamento dos sinais obtidos pelos sensores resistivos para o cálculo dos parâmetros característicos da golfada.

O Capítulo 4 – Resultados e Discussões apresenta os resultados obtidos através das medições experimentais para a grade de testes utilizada. O capítulo é dividido em duas seções: (i) a análise da influência da introdução das partículas nos parâmetros característicos do escoamento em golfadas e (ii) a análise da evolução do escoamento ao longo da tubulação. Para o item (i), a análise é dividida em duas partes: uma qualitativa, discutindo as imagens obtidas pela câmera de alta velocidade; e uma quantitativa, visando propor correlações experimentais para os principais parâmetros do escoamento em golfadas (velocidade de translação da bolha alongada, frequência e comprimentos das estruturas).

O Capítulo 5 – Conclusões apresenta, resumidamente, os aspectos mais importantes resultantes do desenvolvimento deste trabalho, focando nas principais conclusões retiradas do capítulo de resultados. Assim, também são apresentadas as sugestões para a realização de trabalhos futuros.

As referências bibliográficas que embasam este trabalho são apresentadas ao final do documento.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

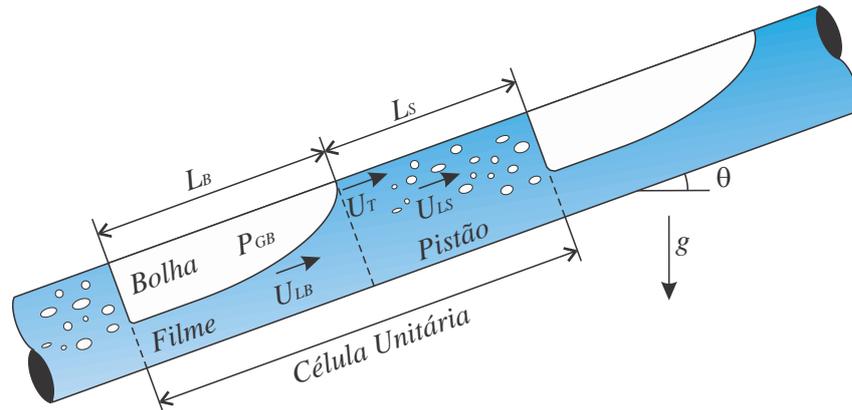
Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica utilizada no desenvolvimento do presente trabalho experimental. Inicialmente são apresentados estudos sobre escoamentos multifásicos. Isto inclui estudos que evidenciam a importância de escoamentos em golfadas, trabalhos sobre transporte de sólidos e trabalhos que explicam a influência das golfadas no transporte de sólidos. Na sequência são apresentados uma revisão das principais correlações e modelos existentes na literatura para estimar cada um dos parâmetros característicos do escoamento em golfadas.

### **2.1 Escoamento multifásicos**

A fim de ter uma maior abordagem do estudo, a revisão bibliográfica é dividida em três seções: trabalhos sobre escoamentos em golfadas, trabalhos sobre transporte de sólidos e trabalhos sobre a influência do escoamento intermitente no transporte de sólidos.

#### **2.1.1 Escoamento em golfadas**

Os primeiros modelos desenvolvidos para escoamento em golfadas foram os modelos em regime permanente, também chamados de modelos estacionários. Esse nome é proveniente do fato de que o escoamento é tratado como estacionário e periódico, ou seja, a célula unitária (bolha e pistão) é igual ao longo do tempo e do espaço. Um dos primeiros modelos teóricos foi desenvolvido por Wallis (1969), que definiu o conceito de célula unitária, como a região composta por um pistão de líquido e uma bolha alongada com seu respectivo filme de líquido, conforme mostrado na Figura 2.1. O autor apresentou correlações para calcular a velocidade da bolha e a queda de pressão na tubulação.



**Figura 2.1 - Definição de célula unitária do escoamento em golfadas, conforme proposto por Wallis (1969).**

Os principais modelos estacionários desenvolvidos para escoamento em golfadas foram o de Dukler e Hubbard (1975) para escoamento horizontal, o de Fernandes et al. (1983) para escoamento vertical, e o de Taitel e Barnea (1990a) e Taitel e Barnea (1990b), um modelo mais geral definido para escoamento com inclinações de  $0^\circ$  até  $90^\circ$ .

Dukler e Hubbard (1975) desenvolveram um modelo do escoamento em golfadas para tubulações horizontais. O modelo é baseado nas equações de conservação da massa e da quantidade de movimento, considerando uma distribuição de pressão linear na região do pistão e uma pressão constante ao longo da bolha alongada. Assim o modelo descreve a dinâmica do escoamento na região de mistura, os autores propõem que a queda de pressão na traseira da bolha é devido à expansão do filme no pistão. A partir do modelo proposto podem-se calcular os parâmetros característicos do escoamento em golfadas, como as velocidades e os comprimentos da célula unitária.

Fernandes et al. (1983) apresentaram um modelo para escoamento vertical em golfadas. O estudo seguiu a linha de proposta de Dukler e Hubbard (1975), incluindo características próprias do escoamento vertical. Os autores também propõem um sistema de equações para calcular a queda de pressão, as velocidades do pistão de líquido, da bolha e do filme, a fração de vazio e a frequência da célula.

Taitel e Barnea (1990a) desenvolveram um modelo mais geral para qualquer inclinação da tubulação (horizontal, vertical e inclinado). No modelo, os autores fazem balanços de massa e de quantidade de movimento na célula unitária. O modelo é composto pelas equações do modelo de bolha, da queda de pressão na célula unitária e equações constitutivas para o seu fechamento, as quais permitem obter parâmetros característicos do escoamento em golfadas,

como o comprimento da bolha alongada, a velocidade do filme de líquido, a fração de vazio da bolha alongada entre outros.

No mesmo ano Taitel e Barnea (1990b) fizeram um estudo mais detalhado da queda de pressão. Através do balanço de massa e quantidade de movimento apresentaram um método para o cálculo da queda de pressão, na qual consideraram termos que tinham sido desprezados no trabalho de Dukler e Hubbard (1975). O método propõe que a queda de pressão na região de mistura pode ser calculada com apenas termos da queda de pressão pela gravidade e por atrito.

Com o desenvolvimento dos computadores surgiram os modelos chamados transientes, que são divididos em três metodologias principais: o modelo de dois fluidos, o modelo de deslizamento (*drift flux*) e o modelo de seguimento de pistões.

Nos modelos de seguimento de pistões, os pistões e bolhas são considerados como elementos separados que se propagam ao longo da tubulação. O modelo emprega uma abordagem lagrangeana para fazer o seguimento das frentes das bolhas e dos pistões.

Um dos primeiros trabalhos desenvolvidos utilizando esse método foi o de Barnea e Taitel (1993). Os autores introduziram a intermitência do escoamento ao longo da tubulação considerando que o comprimento do pistão segue uma distribuição normal. Os autores observaram que o comprimento do pistão tem a forma de uma distribuição log-normal quando o escoamento está completamente desenvolvido.

Mais tarde Taitel e Barnea (1998) apresentaram um modelo de seguimento de pistões para prever sua evolução ao longo da tubulação. Os autores estudaram o efeito da compressibilidade do gás na evolução do comprimento do pistão e na pressão de entrada. Os resultados mostraram que a compressibilidade do gás causa um incremento no comprimento da bolha, porem tem um efeito menor sobre o crescimento do pistão.

Franklin (2004) apresentou uma modelagem matemática e numérica de seguimento de pistões para uma tubulação horizontal. Os autores utilizaram as equações de transporte de massa e de quantidade de movimento em cada bolha e pistão. O modelo considera pistões não areados e as variações de pressão devido à expansão do líquido ao escoar do filme para o pistão que segue. As simulações foram realizadas para dois casos: para escoamentos periódicos e para escoamentos intermitentes na seção de entrada. O modelo mostrou boa concordância com resultados experimentais.

Rodrigues (2009) apresentou um modelo detalhado de seguimento de pistões para escoamento em golfadas em tubulações com qualquer inclinação. O autor obteve expressões para o cálculo da velocidade do pistão e da pressão da bolha através das equações de conservação da massa e quantidade de movimento. O modelo calcula as velocidades dos pistões e a pressão das bolhas através de um sistema de equações lineares, e com auxílio de algumas equações de fechamento são determinados os demais parâmetros de escoamento. O modelo mostrou boa concordância com dados experimentais.

### **2.1.2 Transporte de sólidos**

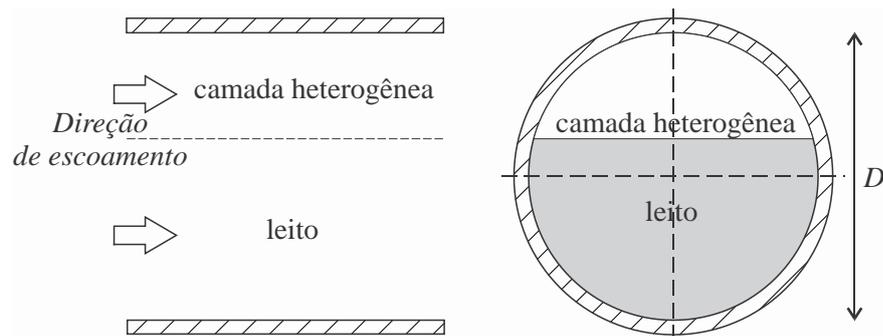
A caracterização do escoamento de misturas sólido-líquido em tubos horizontais é de fundamental importância para o entendimento do escoamento simultâneo sólido-líquido-gás. Muitos pesquisadores desenvolveram modelos para prever o comportamento do escoamento sólido-líquido.

Um dos primeiros trabalhos foi desenvolvido por Oroskar e Turian (1980), os autores desenvolveram um procedimento analítico para determinar a velocidade crítica para o transporte de leitos em tubárias. A velocidade crítica, determina quando os sólidos em suspensão formam leitos no fundo do tubo. Baseada na teoria de turbulência e no equilíbrio de energia necessária para suspender as partículas sólidas desenvolveram uma correlação para a previsão da velocidade crítica.

Posteriormente Davies et al. (1987) adotaram uma abordagem de equilíbrio de forças para o cálculo da condição mínima de transporte de material particulado em tubulações. Davies et al. (1987) propuseram um modelo teórico para o transporte sólido-líquido de forma a calcular a velocidade mínima de líquido requerida para suspender as partículas sólidas em tubos horizontais. O nome é velocidade crítica de deposição. O modelo utiliza a teoria de turbulência e um fator de correção para o amortecimento dos turbilhões devido à presença de sólidos. A equação teórica proposta pelos autores mostrou uma boa concordância com resultados experimentais, assim como também previu uma dependência da velocidade com o diâmetro da partícula. Além disso, foi examinado o comportamento da sedimentação de partículas em relação às velocidades de levantamento de partículas para diferentes tamanhos de turbilhões.

Outros autores desenvolveram abordagens teóricas baseadas na modelagem do fenômeno, tais como o modelo de duas camadas de Doron et al. (1987) e o modelo de três camadas de Doron e Barnea (1993).

Doron et al. (1987) apresentaram um modelo de duas camadas para transporte de suspensões de sólidos em líquido. O modelo propõe que, quando a velocidade média da mistura é muito baixa, um leito estacionário ou móvel de partículas sólidas é formado na parte inferior do tubo e uma mistura heterogênea de líquido e partículas sólidas escoam pela parte superior do tubo, conforme apresentado na Figura 2.2. O modelo teórico permitiu a predição da queda de pressão e a identificação dos padrões para escoamento sólido-líquido. Os resultados do modelo foram comparados com dados experimentais, mostrando boa concordância.

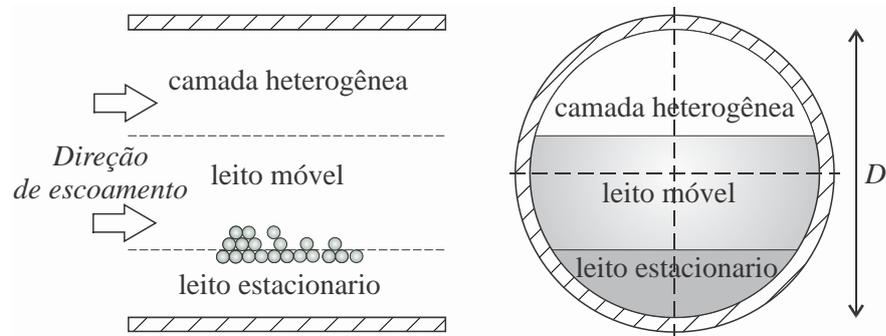


**Figura 2.2 - Representação esquemática do modelo de duas camadas para escoamento sólido-líquido de Doron et al. (1987).**

**Fonte: adaptado de Doron et al. (1987).**

Posteriormente Doron e Barnea (1993) propuseram um modelo de três camadas para descrever o escoamento sólido-líquido em tubulações horizontais. Como mostrado na Figura 2.3, o modelo considera que o escoamento é constituído por três camadas: um leito estacionário na parte inferior do tubo, um leito móvel na região central e uma camada de mistura heterogênea sólido-líquido no topo. Os autores identificaram uma velocidade mínima que é necessária para induzir o movimento do leito móvel. Se a velocidade média do leito móvel for menor que o valor limite estipulado, este leito se tornará estacionário. Este valor limite para a sua velocidade foi encontrado através de um balanço de quantidade de movimento sobre uma partícula na interface entre a camada estacionária e a camada em movimento. O modelo foi comparado com dados experimentais e mostrou resultados com

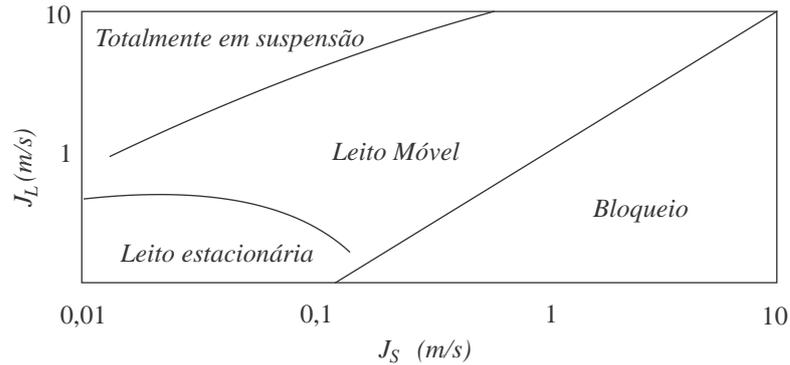
maior precisão que o modelo de duas camadas apresentado anteriormente por Doron et al. (1987).



**Figura 2.3 - Representação esquemática do modelo de três camadas para escoamento sólido-líquido.**

**Fonte: adaptado do Doron e Barnea (1993).**

Outras análises, tais como Doron e Barnea (1995), elaboraram mapas para classificar os diversos padrões de escoamento sólido-líquido. Eles conduziram um trabalho experimental para classificar adequadamente os padrões existentes no escoamento sólido-líquido em dutos horizontais. No trabalho, foram desenvolvidos mapas bidimensionais, conforme mostrado na Figura 2.4, denominados mapas de fluxo para escoamento de sólido e líquido. Nos mapas de fluxo, foram estabelecidas as transições entre três padrões de escoamento bem definidos: escoamento totalmente em suspensão (do inglês, *fully suspended flow*), escoamento com um leito móvel (do inglês, *flow with a moving bed*) e escoamento com um leito estacionário (do inglês, *flow with a stationary bed*). As transições foram determinadas por meio do modelo teórico de três camadas de Doron e Barnea (1993) e verificadas com dados experimentais. Os autores propuseram a apresentação dos mapas através da velocidade da mistura e da concentração das partículas. Como método alternativo, os mapas podem ser apresentados em termos das velocidades superficiais das fases líquida e sólida. Este último é o caso ilustrado na Figura 2.4.



**Figura 2.4 - Mapa de fluxo de escoamento sólido-líquido em dutos horizontais.**  
**Fonte: adaptado de Doron e Barnea (1995).**

### 2.1.3 A influência do escoamento em golfadas no transporte de sólidos

Poucos estudos abordando o escoamento simultâneo de três fases sólido-líquido-gás em tubos horizontais foram encontrados na literatura. Trabalhos como de Stevenson et al. (2001), de Stevenson e Thorpe (2002) e de Stevenson e Thorpe (2003) investigaram a influência do escoamento em golfadas no transporte de partículas em tubulações levemente inclinadas para baixas concentrações de partículas, principalmente de areia.

Stevenson et al. (2001) fizeram um estudo experimental sobre o transporte de baixas concentrações de partículas no escoamento bifásico água-ar no padrão golfadas. O estudo foi realizado em tubos horizontais e levemente inclinados com concentrações abaixo de 1/1000 v/v. No trabalho, a velocidade das partículas de areia com diâmetros entre 0,51 e 1,1 mm foi medida para diferentes vazões de gás e de líquido. A densidade do líquido foi de aproximadamente  $1000 \text{ kg/m}^3$  e a viscosidade estudada ficou na faixa de 1,0-1,7 mPa·s. Os tubos usados foram de 12 m de comprimento, com diâmetro interno de 40 e 70 mm. Com base nos resultados experimentais, foram obtidas correlações para a velocidade de transporte da areia para escoamento intermitente de líquido e gás. Os autores verificaram que a velocidade das partículas no escoamento em golfadas é independente das inclinações da tubulação de até três graus. Além disso, eles obtiveram uma expressão para a velocidade da areia, a qual permite prever a posição de deposição de areia no fundo do duto.

Stevenson e Thorpe (2002) realizaram um estudo experimental em tubos levemente inclinados para medir a velocidade das partículas de areia em escoamento estratificado. Os autores observaram que o transporte das partículas tem um comportamento semelhante para o escoamento monofásico de líquido e para escoamento intermitente líquido-gás. Eles obtiveram uma correlação para a velocidade das partículas, a qual foi extrapolada para obter a

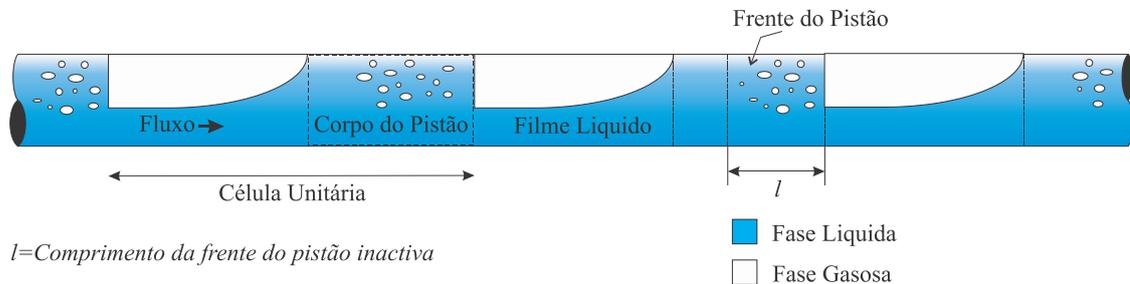
velocidade mínima do fluido que garanta o transporte de areia no padrão de escoamento estratificado. Além disso, os autores observaram que o movimento das partículas é fortemente determinado pelo tamanho da partícula em relação à profundidade da subcamada viscosa na parede do tubo. Assim, se o tamanho de uma partícula é maior do que a subcamada viscosa, ela fica exposta às estruturas turbulentas e, por consequência, fica sujeita a uma maior força de arrasto.

Stevenson e Thorpe (2003) apresentaram uma modelagem do transporte de sólidos em escoamento bifásico líquido-gás no padrão golfadas e um estudo da dissipação da energia na frente do pistão. Mediante um balanço de forças e de energia na frente do pistão, verificaram que a energia dissipada devido à expansão súbita do fluido no filme imediatamente à frente do pistão é maior do que a energia dissipada devido à ação viscosa na parede do tubo. Entretanto, os autores também mostraram que a energia nessa região não é suficientemente grande para o transporte de partículas. Eles concluíram que o transporte de areia no escoamento em golfadas pode ser aproximado por um modelo híbrido de escoamento estratificado e de transporte hidráulico.

Recentemente Gohardeb e Rodgers (2009) e Gohardeb et al. (2009) estudaram a influência do escoamento em golfadas num leito de partículas.

Gohardeb e Rodgers (2009) apresentaram um estudo experimental do escoamento em golfadas gás-líquido no transporte de partículas sólidas no interior de um tubo horizontal. Dois tipos de experimentos foram realizados. O primeiro buscou avaliar a influência do pistão no transporte de partículas sólidas, o que foi realizado mediante a análise de imagens obtidas com uma câmera de alta velocidade. O segundo buscou avaliar a distribuição de velocidades no interior do pistão, utilizando de forma combinada o método de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV, do inglês *Particle Image Velocimetry*) com o método refrativo conhecido por RIM (do inglês, *Refractive Index Matching*<sup>1</sup>) e partículas fluorescentes traçadoras. As combinações destas duas análises experimentais forneceram a base para compreender o mecanismo físico de transporte de partículas sólidas devido ao escoamento em golfadas. Os autores observaram que o corpo do pistão influencia significativamente na mobilidade das partículas sólidas. As distribuições de velocidade medidas mostraram uma queda significativa da velocidade imediatamente à frente do pistão, região é conhecida como frente do pistão

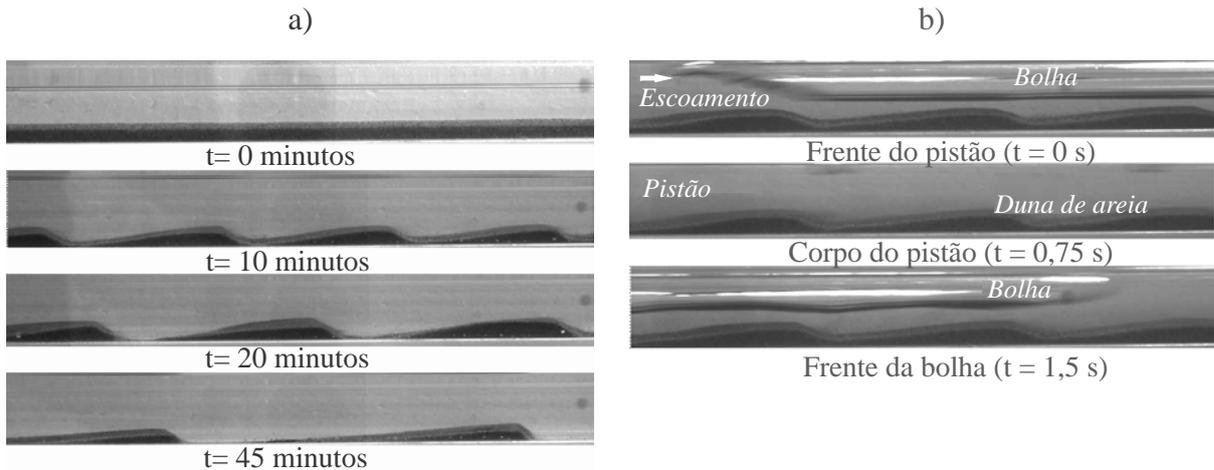
inativa (Figura 2.5). Por conseguinte, concluíram que a velocidade crítica para a elevação das partículas sólidas é atingida mais à montante.



**Figura 2.5 - Representação do escoamento em golfadas e da frente do pistão inativa.**  
**Fonte: adaptado de Goharkeh e Rodgers (2009).**

Posteriormente, Goharkeh et al. (2009) apresentaram um estudo experimental do escoamento trifásico ar-água-areia no interior de um tubo horizontal. O objetivo do trabalho foi de aumentar a compreensão do transporte de areia na presença de escoamento intermitente líquido-gás. Utilizando uma câmera de alta velocidade, os autores avaliaram o comprimento, a altura e a velocidade da frente das dunas dos leitos de areia. A evolução de dunas de areia foi analisada para escoamentos bifásicos e monofásico com diferentes vazões das fases. Foi avaliado o transporte de areia para a mesma vazão de mistura. Os autores verificaram que a vazão de gás não afeta a velocidade média da frente da duna de areia. No entanto, para o fluxo intermitente, o leito de areia foi transportado mais para frente em relação ao transporte hidráulico, tal como mostra a Figura 2. 6. Observaram também que a golfada tem influência significativa na mobilidade das partículas de areia.

<sup>1</sup> Tradução para português não encontrada.



**Figura 2. 6 - a) Evolução da formação da duna de areia para escoamento monofásico. b) Evolução da formação da duna de areia para escoamento líquido-gás em golfadas.**  
**Fonte: adaptado de Gohardeh et al. (2009).**

## 2.2 Parâmetros característicos do escoamento em golfadas

A intermitência dos parâmetros característicos das golfadas – tais como frequência e velocidade de passagem das células unitárias, assim como os comprimentos característicos da bolha e do pistão e suas frações de fase – é motivo de estudos da literatura desde a década de 60. Um dos conceitos básicos utilizados para a definição destes parâmetros são as velocidades superficiais das fases e da mistura. Para o escoamento bifásico líquido-gás com seção transversal constante ( $A$ ), as velocidades superficiais do líquido ( $J_L$ ) e do gás ( $J_G$ ) são definidas como as velocidades que teria cada fase caso ela estivesse escoando sozinha na tubulação (SHOHAM, 2006):

$$J_L = \frac{\dot{Q}_L}{A} \quad (2.1)$$

$$J_G = \frac{\dot{Q}_G}{A} \quad (2.2)$$

sendo  $\dot{Q}_L$  e  $\dot{Q}_G$  as vazões volumétricas do líquido e do gás, respectivamente. Por sua vez, a velocidade da mistura ( $J$ ) é definida como a soma das velocidades superficiais das fases:

$$J = J_L + J_G \quad (2.3)$$

O líquido normalmente pode ser considerado como incompressível, afirmativa que não é válida para o gás. Deste modo, a vazão do líquido (e, em consequência, a sua velocidade superficial) permanece constante ao longo do escoamento. Já a vazão do gás varia de uma

seção para a outra de acordo com a variação da pressão e da temperatura. Através da conservação da massa e ainda considerando um comportamento isotérmico para a fase gasosa, a relação entre as velocidades superficiais do gás entre duas seções (1) e (2) é dada por (RODRIGUES, 2009):

$$J_{G2} = \frac{P_{G1}}{P_{G2}} J_{G1} \quad (2.4)$$

sendo  $P_G$  a pressão do gás.

Diversos estudos da literatura relacionam os parâmetros característicos da célula unitária com números adimensionais. Um parâmetro muito utilizado é o número de Reynolds da mistura, que representa a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas, que pode ser dado como (GARCIA et al. 2007):

$$Re_j = \frac{\rho_L J D}{\mu_L} \quad (2.5)$$

sendo  $\rho_L$  e  $\mu_L$  a massa específica e a viscosidade dinâmica do líquido, respectivamente, e  $D$  o diâmetro do tubo.

Outro número adimensional bastante utilizado é o número de Froude da mistura, que é definido como a razão entre as forças inerciais e gravitacionais do escoamento:

$$Fr_j = \frac{J}{\sqrt{gD}} \quad (2.6)$$

sendo  $g$  é a aceleração da gravidade.

Alguns estudos ainda utilizam a forma adimensional da frequência de passagem das células unitárias ( $f$ ) através do número de Strouhal ( $St$ ), definido como:

$$St = \frac{fD}{J_G} \quad (2.7)$$

Por sua vez, o número de Eötvös representa a relação entre a força de empuxo e a força de tensão superficial, e pode ser definido como:

$$Eo = \frac{D^2 g (\rho_L - \rho_G)}{\sigma} \quad (2.8)$$

sendo que  $\rho_G$  denota a massa específica do gás e  $\sigma$  a tensão superficial da interface entre o líquido e o gás.

A seguir, serão apresentadas as principais correlações experimentais encontradas para caracterizar o escoamento em golfadas, em subseções separadas para: a velocidade de translação da bolha alongada, a frequência do escoamento em golfadas e o comprimento do pistão.

### 2.2.1 Velocidade de translação da bolha alongada

Nicklin et al. (1962) propuseram que a velocidade de translação da bolha alongada ( $U_{TB}$ ) é função da superposição dos efeitos de inércia que a velocidade da mistura impõe sobre a bolha e do deslizamento entre as fases. Matematicamente, a velocidade de translação da bolha pode ser expressa como:

$$U_{TB} = C_0 J + V_D \quad (2.9)$$

sendo que  $C_0$  é um coeficiente empírico referente à distribuição do perfil de velocidades do líquido no pistão e  $V_D$  representa a velocidade de deslizamento entre as fases.  $C_0$  pode ser definido como a razão entre a velocidade máxima e a velocidade média do líquido escoando na frente da bolha na tubulação. Nicklin et al. (1962) propõem um valor de  $C_0=1,2$ , considerando que o escoamento é turbulento e plenamente desenvolvido. Posteriormente, Bendiksen (1984) desenvolveu um estudo experimental para diversas inclinações, sugerindo que  $C_0$  depende do número de Froude da mistura e da inclinação da tubulação conforme:

$$C_0 = \begin{cases} 1,05 + 0,15 \text{sen}^2 \theta; & Fr_j < 3,5 \\ 1,2 & ; Fr_j \geq 3,5 \end{cases} \quad (2.10)$$

sendo que  $\theta$  representa a inclinação da tubulação em relação à horizontal.

Diversos autores trabalharam para estimar o coeficiente  $C_0$  da Eq. (2.9). Nydal et al. (1992) estimaram um valor de  $C_0$  variando entre 1,2 e 1,3. Fabre (1994) mostrou, através de medidas experimentais, que  $C_0=1,2$  para escoamento turbulento plenamente desenvolvido e que  $C_0=2,0$  para escoamento laminar.

A velocidade de deslizamento foi tratada no passado de forma separada para escoamentos na horizontal e vertical. Baseado em um escoamento potencial ao redor do nariz da bolha, diversos autores encontraram uma expressão para a velocidade de deslizamento dado por.

$$V_D = C_\infty \sqrt{gD} \quad (2.11)$$

sendo  $C_\infty$  um coeficiente empírico que quantifica o parâmetro de deslizamento. Deste modo, para escoamento na vertical, estudos como Davies e Taylor (1950) encontraram um valor de  $C_\infty=0,35$ . Já na horizontal, ainda não existe um consenso quanto ao valor de  $C_\infty$ . Diversos pesquisadores (DUKLER e HUBBARD, 1975; DUKLER et al., 1985; PETALAS e AZIZ, 1998) não consideram a velocidade de deslizamento na horizontal, argumentando que a força de gravidade não age na direção do escoamento. Porém, outros autores (NICKLIN et al., 1962; BENJAMIN, 1968; BENDIKSEN, 1984; VICENCIO, 2013) afirmam que este deslizamento existe em função do formato da bolha alongada e da consequente diferença de pressão entre a frente e a traseira da bolha alongada.

Weber (1981) propõe uma correlação para encontrar a constante  $C_\infty$ , em função do número de Eötvös, dada por:

$$C_\infty = 0,54 - 1,76Eo^{-0,56} \quad (2.12)$$

Bendiksen (1984) propôs uma correlação para tubulações inclinadas entre  $-90^\circ$  e  $90^\circ$ , dado conforme:

$$C_\infty = \begin{cases} 0,54\cos\theta + 0,35\sin\theta, & \text{para } Fr_j < 3,5 \\ 0,35\sin\theta & , \text{ para } Fr_j \geq 3,5 \end{cases} \quad (2.13)$$

## 2.2.2 Frequência de passagem da célula unitária

Determinar a frequência de passagem da célula unitária foi o motivo de estudo de diferentes autores devido à sua importância na caracterização da célula unitária a partir de modelos estacionários (TAITEL e BARNEA, 1990a), assim como na predição de erosão da parede interna de dutos de extração de petróleo. Dessa forma, autores como Gregory e Scott (1969) e Zabarás (2000) apresentaram correlações empíricas para este parâmetro.

A frequência do escoamento em golfadas ( $f$ ) é definida como o inverso do tempo de passagem de uma célula unitária por uma determinada seção transversal da tubulação.

$$f = \frac{1}{T_B + T_S} \quad (2.14)$$

sendo  $T_B$  e  $T_S$  os tempos de passagem da bolha e do pistão, respectivamente. Baseado na hipótese de Fabre (2003), que considera que a célula unitária traslada com velocidade  $U_{TB}$ , a frequência pode ser calculada como:

$$f = \frac{U_{TB}}{L_B + L_S} \quad (2.15)$$

Autores como Gregory e Scott (1969) propuseram uma correlação experimental para determinar a frequência em tubulações horizontais. Eles identificaram que a frequência está relacionada com as velocidades superficiais e a geometria da tubulação, dada pela seguinte relação:

$$f = 0,0226 \left[ \left( \frac{J_L}{gD} \right) \frac{19,75}{J} + J \right]^{1,2} \quad (2.16)$$

Greskovich e Shrier (1972) adimensionalizaram a correlação de Gregory e Scott (1969), mostrando que ela pode ser escrita em função da fração de líquido no caso de não-deslizamento (representado pela razão entre a velocidade superficial de líquido e da mistura,  $J_L/J$ ) e do número de Froude da mistura:

$$f = 0,0226 \left[ \left( \frac{J_L}{J} \right) \frac{2,02}{D} + Fr_j \right]^{1,2} \quad (2.17)$$

Posteriormente Zabarás (2000) desenvolveu um estudo experimental para o escoamento com inclinações de 0° a 11° e diâmetros internos entre 0,0254 e 0,203 m. O autor apresentou uma extensão da correlação proposta originalmente por Gregory e Scott (1969) para considerar o efeito da inclinação.

$$f = 0,0226 \left[ \left( \frac{J_L}{gD} \right) \frac{19,75}{J} + J \right]^{1,2} \left[ 0,836 + 2,75(\text{sen}\theta)^{0,25} \right] \quad (2.18)$$

### 2.2.3 Comprimento do pistão

O comprimento do pistão é definido como a distância entre duas bolhas consecutivas. Numa região plenamente desenvolvida, o comprimento tende a atingir um valor estável. Devido à complexidade da região de recirculação gerada na traseira da bolha alongada, região conhecida como esteira da bolha alongada, a literatura contém pouca informação para avaliação do comprimento do pistão. Uma constatação importante e bastante utilizada na literatura é de que o pistão possui comprimento entre 12 e 20 vezes o valor do diâmetro interno da tubulação (DUKLER e HUBBARD, 1975). Esta constatação foi novamente afirmada por Nicholson et al. (1978) e por Nydal et al. (1992), que expandem a faixa para 12 a 30D vezes o valor do diâmetro.

### **2.3 Considerações finais**

Neste capítulo foram apresentados conceitos e correlações experimentais para escoamentos multifásicos, assim como uma revisão específica de trabalhos sobre o escoamento em golfadas e o escoamento com presença de partículas. Da literatura observada, nota-se que os estudos existentes de escoamento particulado focam sua investigação na sedimentação de partículas e no movimento de leitos de areia em linhas de fluxo multifásico. A pouca literatura existente sobre escoamento simultâneo sólido-líquido-gás prevê a influência do escoamento em golfadas no transporte de partículas, mas ainda não foi realizado um estudo para analisar a influência dos sólidos no escoamento em golfadas. Nesse cenário, torna-se propício e desejável o estudo da influência do sólido na dinâmica do escoamento sólido-líquido-gás no padrão golfadas em uma tubulação horizontal, a fim de compreender o comportamento fundamental do escoamento em golfadas na presença de sólidos e de fornecer correlações experimentais para estimar os parâmetros característicos desse tipo de escoamento.

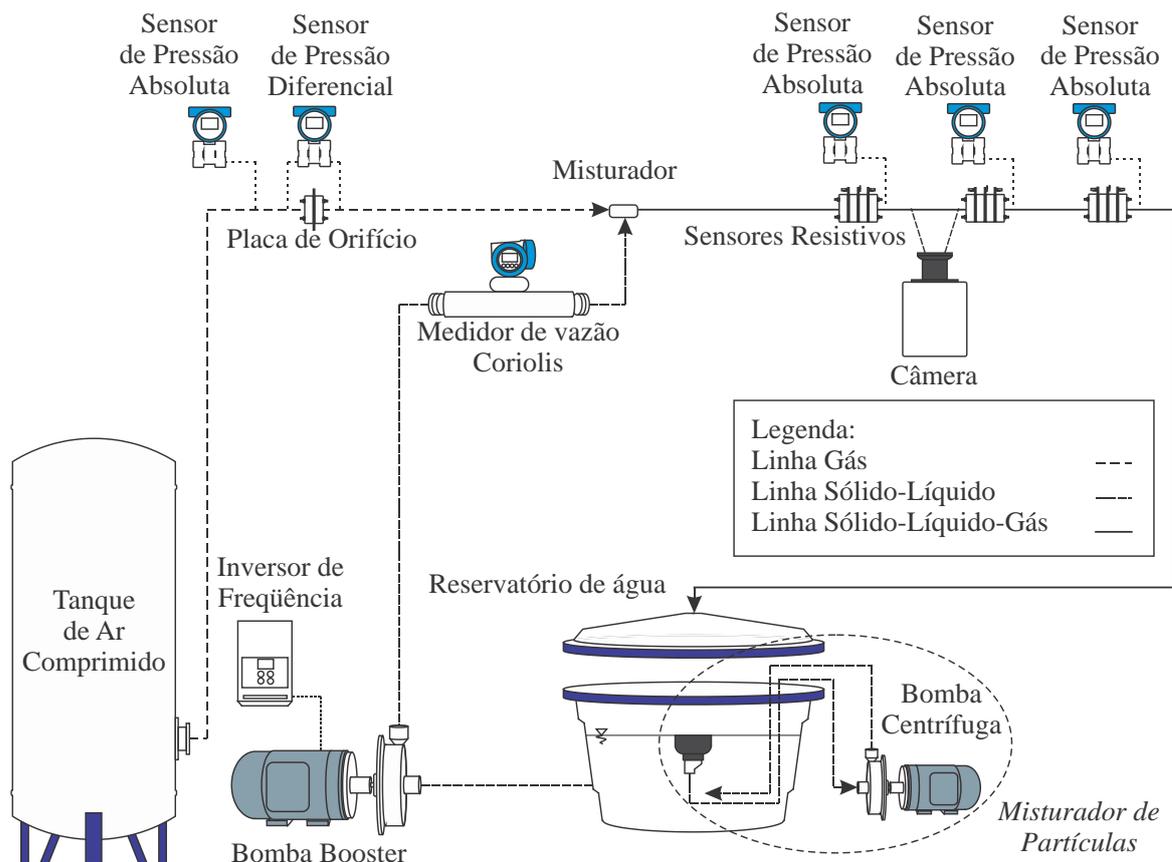
### 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

No presente capítulo é apresentada a metodologia experimental utilizada no desenvolvimento do presente trabalho. Na primeira parte são mostrados os detalhes dos equipamentos e o funcionamento do circuito experimental. A seguir são descritos o sensor resistivo utilizado, a câmera de alta velocidade e o sistema de aquisição de dados. Ao final é descrito a metodologia utilizada para o processamento dos sinais obtidos pelos sensores resistivos, além de relações utilizadas para o processamento dos dados.

#### 3.1 Circuito experimental

As medições experimentais foram realizadas nas instalações do laboratório do Núcleo de Escoamentos Multifásicos (NUEM/UTFPR). A bancada existente foi adaptada e aprimorada para atingir os objetivos do presente projeto. O circuito experimental pode ser dividido em três regiões: uma linha de gás, uma linha para a mistura de líquido e partículas, e uma linha de testes aonde escoa a mistura trifásica sólido-líquido-gás. O circuito possui um sistema supervisorio para monitorar as diferentes propriedades dos fluidos, assim como suas velocidades superficiais na entrada da tubulação. Uma representação esquemática do circuito experimental utilizado é apresentada na Figura 3.1.

Uma breve descrição do funcionamento da bancada é mostrada a seguir. A mistura sólido-líquido é transportada por uma bomba *booster*, a qual é acionada por um inversor de frequência. A linha sólido-líquido começa no reservatório onde as fases são misturadas através de uma bomba centrífuga antes de ser transportada pela bomba *booster*. A mistura sólido-líquido é impulsionada ao longo da tubulação pela bomba centrífuga, passando por um medidor de vazão mássica do tipo Coriolis. Paralelamente, o gás proveniente do tanque de ar comprimido é conduzido ao misturador, passando por uma placa orifício calibrada de modo a medir a vazão volumétrica de gás. As duas linhas (de gás e de dispersão de partículas no líquido) chegam até a seção de testes, onde as fases são misturadas, dando início ao escoamento trifásico sólido-líquido-gás. A mistura escoa através de um tubo de acrílico transparente, passando por três estações de medição de fração de gás que utilizam conjuntos de sensores resistivos. Uma câmera de alta velocidade é utilizada para a captura de imagens do escoamento em uma estação. Ao final da linha trifásica a mistura retorna ao reservatório, onde as fases sólido, líquido e gás são separados pela gravidade.



**Figura 3.1 - Bancada experimental.**

A seguir, cada subseção irá descrever os diferentes pontos da bancada experimental, referentes à linha sólido-líquido, à linha de gás, à linha trifásica sólido-líquido-gás, aos sensores resistivos, à câmera de alta velocidade, à posição das estações de teste ao longo da tubulação e ao sistema de aquisição de dados.

### 3.1.1 Linha sólido-líquido

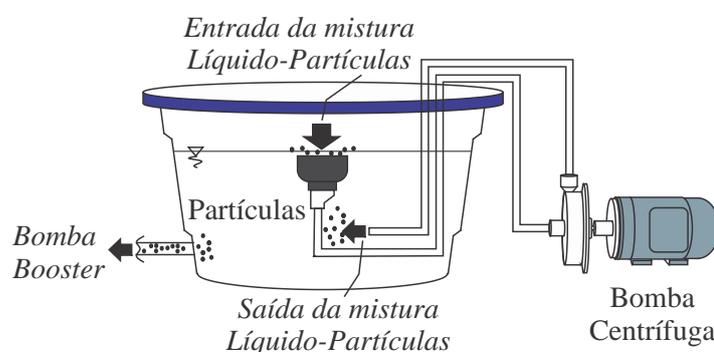
A linha sólido-líquido começa no reservatório, que possui uma capacidade de armazenamento de 310 litros e fornece a quantidade de mistura suficiente durante os testes. As fases de sólido e líquido são misturadas através de uma bomba centrífuga, a qual faz a mistura recircular no reservatório com o objetivo de obter uma dispersão homogênea na entrada na bomba *booster*. A bomba centrífuga é da marca Schneider, modelo BCR-2000V, com potência de 0,5 HP.

A Figura 3.2 mostra uma imagem e um desenho esquemático do funcionamento do misturador de partículas utilizado no presente trabalho. A forma do desenho do misturador

responde ao fato que a massa específica da partícula utilizada é levemente menor que da água e tende a permanecer acima do líquido. A bomba centrífuga succiona a mistura líquido-partícula presente na superfície da água e faz recircular através da tubulação, retornando pela parte inferior do reservatório. Esse movimento contínuo gera uma dispersão homogênea de líquido e partículas no reservatório.



a)



b)

**Figura 3.2 - a) Imagem do tanque com o misturador de partículas e b) desenho esquemático do funcionamento do misturador de partículas.**

Em seguida, a mistura é impulsionada pelo duto através de uma bomba *booster* da marca Fabo, modelo BCIE602/7822, com potência de 3 HP. A bomba é acionada através de um inversor de frequência da marca WEG, modelo CFW08. Para medir a vazão da dispersão, é utilizado um medidor tipo Coriolis da marca MicroMotion, modelo F050S11, cuja vazão máxima é de  $1,5 \text{ dm}^3/\text{s}$ . O medidor de vazão possui protocolo de rede industrial *Foundation Fieldbus*, que permite a comunicação com o sistema de aquisição de dados.

A Tabela 3.1 apresenta uma descrição técnica das principais características dos equipamentos mencionados.

**Tabela 3.1 - Descrição técnica dos equipamentos utilizados na linha sólido-líquido.**

<i>Equipamento</i>	<i>Marca / Modelo</i>	<i>Observações</i>
Bomba Centrífuga	Schneider BCR-2000V	Altura máxima 20 m.c.a. Vazão máxima 5,30 m <sup>3</sup> /h Motor 3450 RPM 1/2HP 220V/1/60Hz Corrente 4,1 A
Bomba Booster	Fabo BCIE602/7822	Altura máxima 20 m.c.a. Vazão máxima 1500 L/h Motor 3450 RPM 220V/3/60Hz Corrente 8,39 A
Inversor de Frequência	WEG CFW08	Trifásico 200-240V, 50-60Hz, Microprocessador com display
Medidor de vazão tipo Coriolis	MicroMotion F050S11	Vazão máxima 1,2 l/s Temperatura máxima 25°C Pressão máxima 2 barg Densidade máxima 3000 kg/m <sup>3</sup>

### 3.1.2 Linha de gás

A linha de gás inicia-se no tanque de ar comprimido, com capacidade de 500 litros, que é alimentado por um compressor alternativo da marca PEG, modelo NBP-10, com potência de 2 HP, deslocamento teórico de 10 pés<sup>3</sup>/min e pressão máxima de 120 psi (8,3 bar). O objetivo do tanque de ar é minimizar as oscilações de pressão causadas pelo funcionamento do compressor alternativo, garantindo um escoamento estável.

A vazão volumétrica de gás foi monitorada através de duas placas de orifício, com diâmetros de orifício de 1 e 2 mm. As placas de orifício foram previamente calibradas utilizando rotâmetros da marca *Rheotest Haake*, modelo GMBH. Para monitorar as propriedades do gás, foram empregados sensores de pressão com sonda resistiva incorporada do tipo PT100 para a medição da temperatura. Cabe ressaltar que os sensores de pressão possuem compatibilidade com o protocolo de comunicação *Fieldbus*.

### 3.1.3 Linha trifásica sólido-líquido-gás

A linha trifásica inicia-se no misturador e desenvolve-se por uma seção de testes horizontal de 9 m de comprimento e 26 mm de diâmetro interno. O material escolhido para a

tubulação de teste foi o acrílico, de característica transparente, o que permite a visualização do escoamento.

Três conjuntos de sensores do tipo resistivo foram montados ao longo da tubulação com a finalidade de monitorar as estruturas do escoamento, procurando um escoamento completamente desenvolvido e desprezando o fenômeno de iniciação das golfadas e suspensão das partículas. Imediatamente após cada conjunto de sensor resistivo, foram colocados sensores de pressão relativa a fim de recalcular as velocidades superficiais nas seções de teste, conforme mencionado na Eq. (2.4). Adicionalmente, foi utilizado um barômetro para medir a pressão atmosférica local, permitindo o cálculo da pressão absoluta em cada estação de medição. A Tabela 3.2 descreve as características técnicas dos sensores de pressão utilizados nas medições.

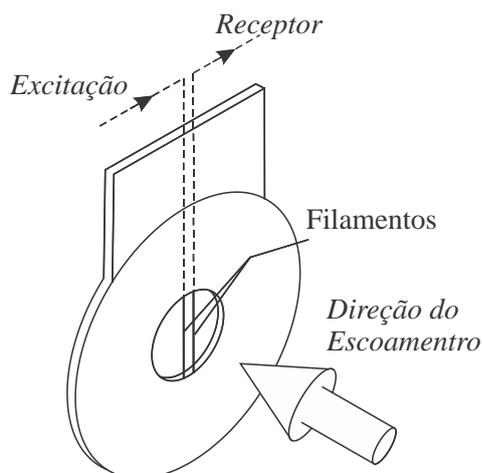
**Tabela 3.2 - Características técnicas dos sensores de pressão.**

<i>Equipamento</i>	<i>Marca/Modelo</i>	<i>Detalhe</i>
Sensor de pressão relativa	(1) Rosemount 3051 TG2 (2) Rosemount 2051 TG2	Pressão máxima de 150PSI, entrada 9,0-32,0 VDC, 17,5 mA
Barômetro	Smar LD301	Pressão máxima 3600 PSI, entrada 12-42 VDC, 4-20 mA

### 3.1.4 Sensores resistivos

Os sensores resistivos utilizados no presente estudo foram desenvolvidos por Machado et al. (2013). Seu princípio de funcionamento baseia-se no fato de que cada fase apresenta condutividade elétrica diferente. Assim, a resistência elétrica medida varia conforme a distribuição das fases, o que possibilita estimar a quantidade de cada uma delas em determinada seção do escoamento.

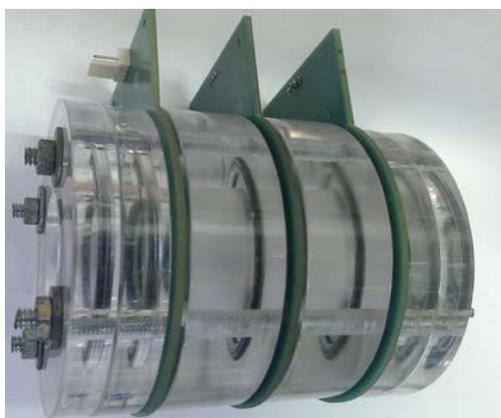
O sensor utilizado é formado por uma placa de circuito impresso (PCI) em fibra de vidro, que contém um arranjo de dois fios paralelos fabricados em aço inox, com diâmetro de 0,12 mm e separados por 3 mm. Um dos fios funciona como eletrodo de excitação e o outro como eletrodo de recepção. A Figura 3.3 mostra um esquema do sensor.



**Figura 3.3 - Esquema representativo do sensor resistivo.**

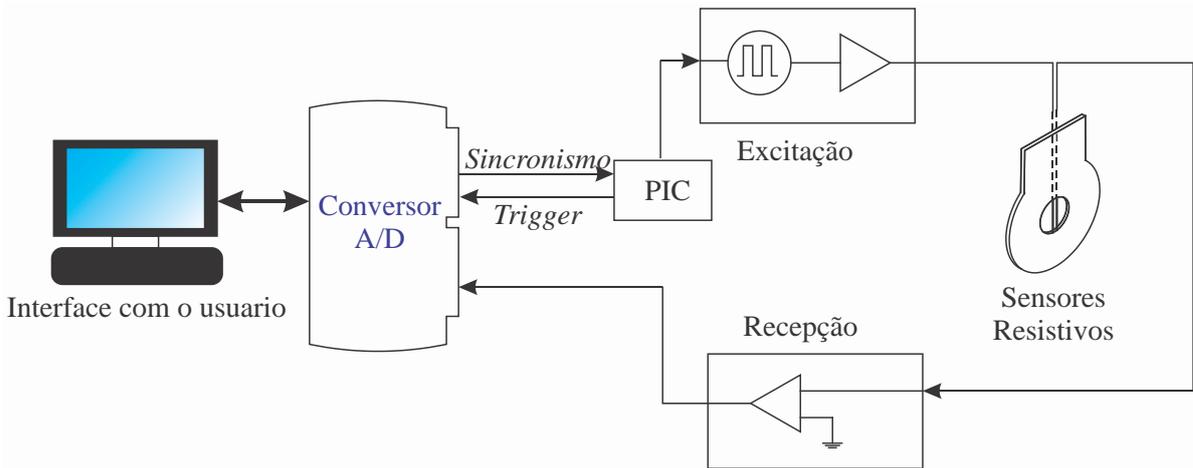
O eletrodo de excitação é alimentado por um sinal quadrado de  $\pm 5,0V$  de amplitude e frequência de 1,75 kHz, que é transmitido, através do fluido presente na seção, para o eletrodo de recepção. A tensão no receptor é uma função linear da quantidade de líquido presente na seção, sendo máxima quando o tubo está cheio de líquido e mínima quando o tubo está vazio (cheio de gás). Essa dependência linear da tensão possibilita calcular a fração de vazio na seção.

Para possibilitar a medição de velocidades, foi concebido um arranjo de três placas com flanges de acrílico em paralelo, conforme apresentado na Figura 3.4. A placa localizada no centro do arranjo é ligada ao potencial nulo (aterramento), procurando eliminar possíveis interferências. As placas localizadas nas extremidades são sensores separados por 5 cm, que permitem a obtenção da velocidade da frente da bolha alongada a partir do tempo de defasagem na detecção dos sinais entre os dois sensores.



**Figura 3.4 - Arranjo dos sensores resistivos para a medição da velocidade de translação da bolha alongada.**

Um circuito eletrônico controla a geração dos sinais de excitação, a recepção dos sinais analógicos dos sensores e a comunicação com o computador. A Figura 3.5 apresenta um diagrama esquemático do sistema. O microcontrolador PIC recebe o sinal de sincronismo proveniente da placa de aquisição de dados *National Instruments NI USB-6211* e gera pulsos de excitação, que passam por um amplificador para intensificação do sinal. O sinal amplificado é recebido pelo sensor resistivo, que envia um sinal analógico de resposta, também amplificado antes de ser conduzido para a placa de aquisição de dados. A placa de aquisição de dados é responsável pela conversão dos sinais analógicos em digitais e pela comunicação com o computador. Um programa desenvolvido em *LabVIEW* permite a comunicação gráfica com usuário.

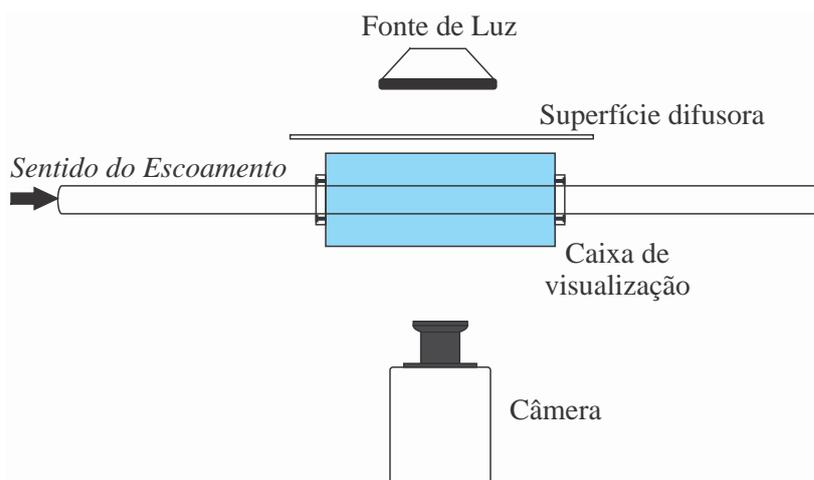


**Figura 3.5 - Diagrama esquemático do circuito eletrônico.**  
**Fonte: adaptado de Machado et al. (2013).**

### 3.1.5 Câmera de alta taxa de aquisição de dados

Com o objetivo de visualizar, em detalhes, o padrão de escoamento em golfadas com presença de material particulado, uma câmera de alta taxa de aquisição de dados foi utilizada. A câmera, da marca *Vision Fastcam* e modelo SA4, é capaz de fornecer uma taxa de aquisição de até 3600 frames/s quando em sua resolução máxima de 1024x1024 pixels, contando com memória interna de 8 GB. Utilizou-se uma lente AF *Micro-Nikkor* com 60 mm de distância focal e abertura máxima de f/2.8D. Os parâmetros da captura de imagens foram ajustados através de um software próprio da câmera.

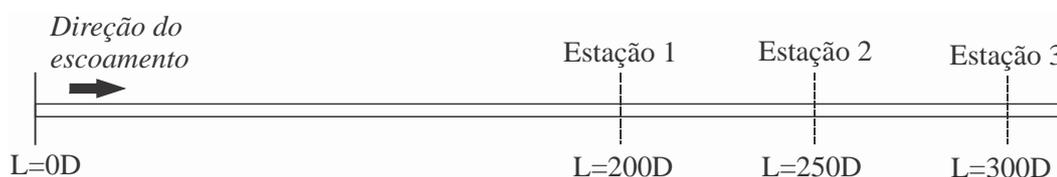
Buscando melhorar a iluminação das imagens e reduzir os efeitos da refração da luz, uma caixa de acrílico, preenchida com água, foi posicionada na região do tubo onde a captura de imagens foi feita. Entre essa caixa de visualização e a fonte de luz utilizada, foi posicionada uma superfície difusora, visando obter uma iluminação uniforme na região de captura de imagens. A Figura 3.6 apresenta um esquema da região de captura de imagens.



**Figura 3.6 - Arranjo da câmera e iluminação para captura de imagens do escoamento.**

### 3.1.6 Estações de medição

Buscando-se analisar os parâmetros do escoamento em golfadas, foram escolhidas três seções de medição, chamadas aqui de “estações”. As estações foram posicionadas a 200D, 250D e 300D da entrada da seção de teste e foram numeradas como 1, 2 e 3, conforme mostrado na Figura 3.7. A câmera de filmagem foi posicionada na região da estação 2.



**Figura 3.7 - Posicionamento das estações de medição.**

### 3.1.7 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é utilizado para monitorar e supervisionar as propriedades e variáveis operacionais do escoamento. A aquisição de dados é realizada através de uma rede de comunicação com protocolo *Foundation Fieldbus*.

Os diferentes sinais provenientes dos sensores de pressão, vazão e temperatura são recebidos por uma placa da *National Instruments* que converte os sinais analógicos em digitais. Esses sinais podem ser visualizados e armazenados no computador através de um programa criado em *LabVIEW*, também da *National Instruments*.

## 3.2 Procedimentos de medição

Os experimentos foram executados em duas etapas: a primeira apenas para líquido-gás e a segunda para sólido-líquido-gás. Os pontos experimentais foram definidos em função das velocidades superficiais de líquido e gás e da quantidade de partículas utilizada, levando em conta as limitações da bancada.

### 3.2.1 Procedimento para escoamento líquido-gás

Os testes para escoamento líquido-gás foram realizados com o propósito de servir como referência para comparação dos parâmetros característicos das golfadas. Os seguintes passos foram seguidos para a realização dos experimentos:

- i. Inicia-se colocando a câmera na seção de testes. A correta iluminação é ajustada, assim como o foco da lente na região de filmagem. Em seguida, a comunicação entre a câmera e o computador é inspecionada e os parâmetros de filmagem são fixados.
- ii. Ligam-se os sensores de pressão, temperatura e os medidores de vazão. Em seguida, o sistema de aquisição de dados é acionado para verificar o seu correto funcionamento e a sua comunicação com os sensores.
- iii. Verifica-se a disposição das válvulas das linhas de gás e líquido, para garantir a correta medição dos sensores.
- iv. Examina-se a pressão no tanque de ar comprimido a fim de garantir o abastecimento constante de gás. A pressão de gás é fixada e mantida constante através de um regulador de pressão localizado na descarga do tanque.

- v. Liga-se a bomba *booster*, deixando o líquido circular pelo duto. Isso serve para calibrar e conferir o correto funcionamento dos sensores resistivos. A calibração dos sensores é repetida várias vezes durante as medições, pois foi observado que um incremento da temperatura do líquido afeta a resposta dos sensores.
- vi. Ajustam-se as vazões de gás e de líquido que correspondem às velocidades superficiais do ponto experimental a ser medido. A vazão de líquido é inserida no programa de aquisição de dados, que por sua vez envia o sinal para o inversor de frequência que ajusta automaticamente a rotação da bomba. A vazão de gás é ajustada manualmente através de uma válvula do tipo agulha, que conecta a linha de gás com à entrada da linha de testes.
- vii. Aguarda-se um período de tempo para a estabilização das vazões e inicia-se a aquisição de dados. Os sensores de pressão, de temperatura, de vazão volumétrica, os sensores resistivos e a câmera estão ligados ao sistema de aquisição de dados de forma que a gravação dos dados começa simultaneamente ao clicar no botão de *trigger* (gravar) do programa implementado em *LabView*.
- viii. Repete-se os passos *vi* e *vii* para os outros pares de vazões de líquido e gás.

### 3.2.2 Procedimento para escoamento sólido-líquido-gás

A aquisição de dados foi realizada da seguinte maneira:

- i. Realizam-se os passos *i* até *iv* da seção anterior.
- ii. Coloca-se a massa de partículas desejada no reservatório e liga-se a bomba centrífuga. Deixa-se a mistura água-partículas recircular pela seção de testes por no mínimo três minutos, de forma a obter uma mistura homogênea entre as fases.
- iii. Repetem-se os passos *v*, *vi* e *vii* da seção anterior. Cabe ressaltar que o medidor Coriolis fornece a vazão da mistura sólido-líquido, então o programa de aquisição faz um cálculo interno para indicar qual a vazão de líquido que está passando pela tubulação para essa massa de partículas.

- iv. Verifica-se o estado de limpeza dos sensores resistivos. Isso deve ser feito para evitar que partículas fiquem presas nos filamentos dos sensores resistivos, o que geraria sinais incorretos.
- v. Adiciona-se partículas no reservatório e repete-se os processos *ii* a *iv*.

### 3.3 Processamento dos Sinais

O processamento dos sinais é baseado no algoritmo desenvolvido por Vicencio (2013) em MATLAB. O algoritmo está preparado para processar frações de gás ( $R_G$ ), fornecendo valores para: velocidade da frente da bolha, frequência de passagem das células unitárias, comprimentos da bolha e do pistão, e frações de gás nas regiões da bolha e do pistão. Os sensores resistivos fornecem sinais de tensão. Como a altura do filme líquido ( $h_{LB}$ ) é uma função linear da tensão elétrica, pode-se determinar  $h_{LB}$  através de:

$$\frac{h_{LB}}{D} = \frac{V(t) - V_V}{V_C - V_V} \quad (3.1)$$

sendo  $V(t)$  a tensão em um determinado instante de tempo,  $V_V$  a tensão quando o tubo está vazio e  $V_C$  a tensão quando o tubo está completo de líquido.

Analisando a seção transversal do escoamento, mostrada na Figura 3.8 para uma seção na região da bolha alongada, encontra-se uma relação geométrica entre a altura do filme líquido e a fração de gás ( $R_G$ ):

$$R_G = 1 - \frac{1}{\pi} \left[ \arccos \left( 1 - \frac{2h_{LB}}{D} \right) - \left( 1 - \frac{2h_{LB}}{D} \right) \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{2h_{LB}}{D} \right)^2} \right] \quad (3.2)$$

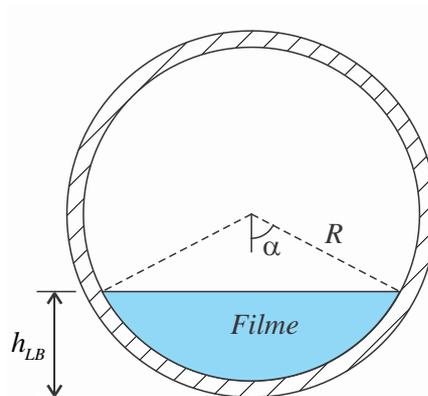


Figura 3.8 - Seção transversal do tubo na região da bolha alongada.

### 3.3.1 Tratamento da série temporal

A Figura 3.9 apresenta uma série temporal da fração de gás a partir dos dados processados do sensor resistivo. Uma linha de fator de corte (FC) é associada aos sinais para identificar as estruturas do escoamento em golfadas. Todo sinal acima dessa linha corresponde à bolha alongada (região com gás predominante), enquanto os sinais que estão abaixo correspondem ao pistão de líquido (região de líquido predominante). As análises são feitas através de uma função binária, análoga à função indicadora de fase proposta por Bertola (2003):

$$u(R_G, t) = \begin{cases} 0; & \text{se } R_G < FC \\ 1; & \text{se } R_G > FC \end{cases} \quad (3.3)$$

Os fatores de corte (FC) são escolhidos para cada série temporal em função da combinação das velocidades superficiais de líquido e de gás e ainda em função da aeração encontrada, variando entre o máximo e o mínimo da fração de gás.

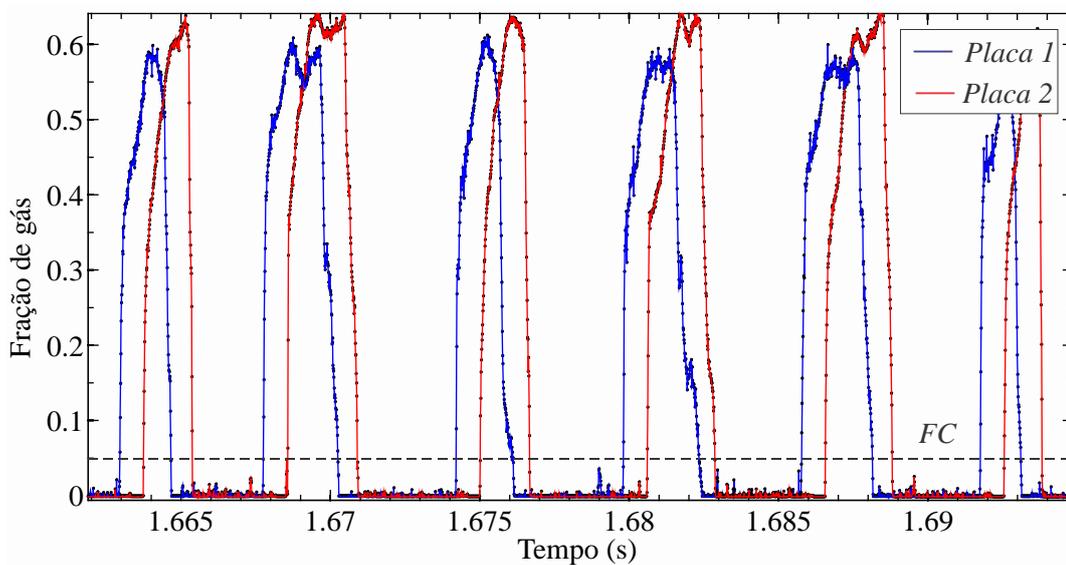


Figura 3.9 - Série temporal da fração de gás para o escoamento em golfadas.

### 3.3.2 Cálculo dos parâmetros característicos das golfadas

A Figura 3.10 mostra a função binária obtida para um escoamento intermitente, representando os sinais das duas placas de um sensor resistivo. Os valores  $T_B$  e  $T_S$  representam o tempo de passagem da bolha e do pistão, respectivamente. A defasagem entre dois sensores

para a detecção da frente da bolha,  $\Delta T_B$ , permite o cálculo da velocidade da frente da bolha ( $U_{TB}$ ), conhecendo-se a separação entre as duas placas ( $d_s$ ):

$$U_{TB} = \frac{d_s}{\Delta T_B} \quad (3.4)$$

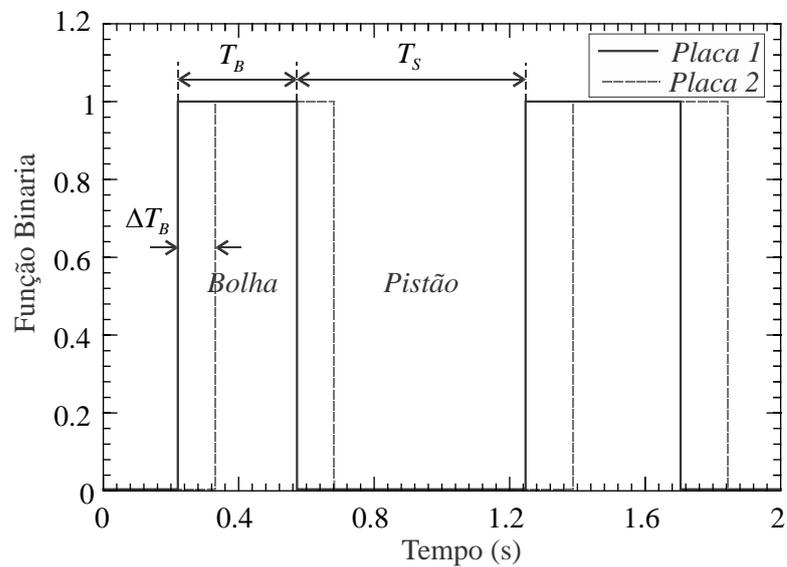
Baseado na hipótese de Fabre (2003), os comprimentos do pistão ( $L_S$ ) e da bolha ( $L_B$ ) são calculados assumindo que toda a célula unitária escoa com a velocidade da frente da bolha. Assim:

$$L_B = U_{TB} T_B \quad (3.5)$$

$$L_S = U_{TB} T_S \quad (3.6)$$

A frequência da célula unitária ( $f$ ) é calculada como o inverso do período que ela leva para passar pelo sensor:

$$f = \frac{1}{T_B + T_S} \quad (3.7)$$



**Figura 3.10 - Série temporal binarizada.**

### 3.4 Análise estatística dos parâmetros

Devido à natureza intermitente dos parâmetros característicos do escoamento em golfadas, torna-se necessário realizar uma análise estatística das variáveis. Para isso, os dados foram tratados utilizando diagramas de caixa e Funções Densidade de Probabilidade (PDF).

#### 3.4.1 Função Densidade de Probabilidade

A Função Densidade de Probabilidade (PDF, do inglês *Probability Density Function*) descreve a probabilidade de uma variável aleatória assumir valores em uma determinada faixa. Assim, a função  $f(x)$  é considerada uma função densidade de probabilidade quando satisfaz as seguintes propriedades:

$$F_x(x) = P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx \quad (3.8)$$

$$f(x) \geq 0 \quad (3.9)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (3.10)$$

sendo que  $P(a \leq X \leq b)$  representa a probabilidade da variável aleatória  $X$  assumir valores entre  $a$  e  $b$ .

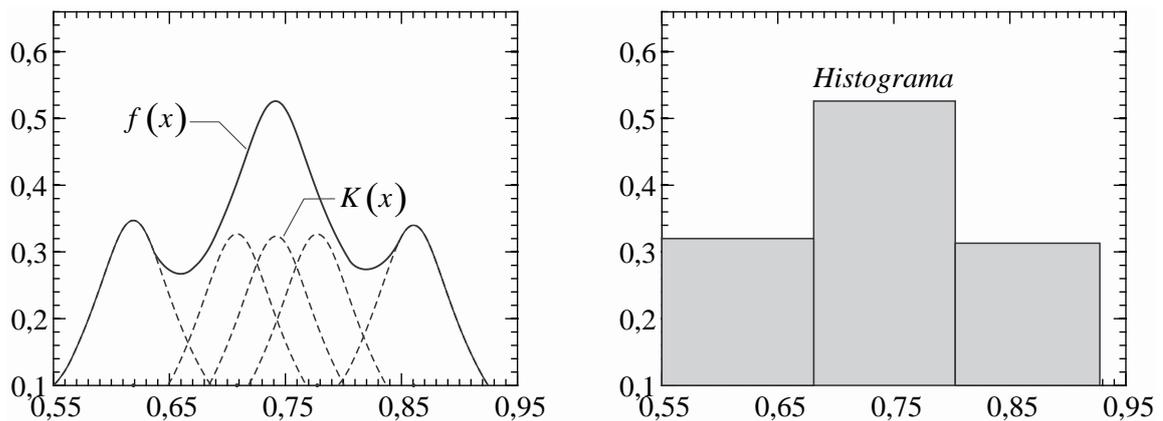
Existem diferentes funções de densidade de probabilidade para ajustar os parâmetros das golfadas. Porém, no presente trabalho utilizou-se uma estimativa de densidade de *Kernel*, com funções de densidade de *Kernel* normal. O *Kernel*  $K(x)$  é uma função de densidade que se associa a cada um dos dados ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ). A soma ponderada dessas funções é um estimador para prever a função de densidade desconhecida  $f(x)$ , conforme mostrado na Eq. (3.11). Esse somatório é uma função contínua que suaviza o perfil da PDF, permitindo observar diferenças que os histogramas não podem mostrar:

$$f(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \quad (3.11)$$

A largura de banda  $h$  é o parâmetro de suavização de  $f(x)$ . Quanto maior for o valor de  $h$ , maior é a influência do *Kernel* para os pontos vizinhos. Para o presente trabalho, o *Kernel* utilizado é o normal, dado por:

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (3.12)$$

A Figura 3.11 apresenta uma comparação entre um histograma e o ajuste feito pela função *Kernel*. Percebe-se, claramente, que função *Kernel* possui um caráter contínuo, enquanto o histograma possui um caráter discreto.



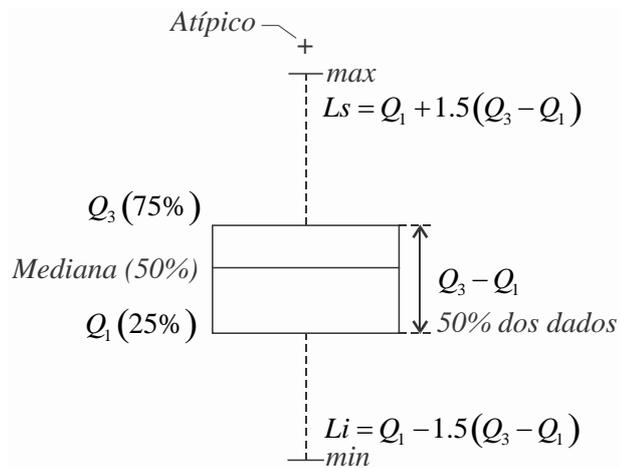
**Figura 3.11 - Comparativo entre a função densidade *Kernel* e o histograma.**

### 3.4.2 Diagrama de Caixas

O *diagrama de caixas*, também conhecido como *diagrama de caixa e bigodes* ou *boxplot*, é uma representação visual da distribuição de dados baseada em quartis, o que permite analisar a variação de uma variável em um grupo de dados. O diagrama fornece informações sobre a mediana  $Md$ , o primeiro e o terceiro quartil ( $Q_1$  e  $Q_3$ , respectivamente), e os valores mínimo e máximo dos dados. O diagrama de caixas ainda indica a existência de valores atípicos e a assimetria da distribuição.

Na Figura 3.12 é mostrado um exemplo de diagrama de caixa. Para a construção do gráfico, é necessário calcular a mediana e os quartis. A mediana representa 50% dos dados, o quartil inferior ( $Q_1$ ) contém 25% dos menores valores e o quartil superior ( $Q_3$ ) contém 75% de todas as medidas. Desse modo, a caixa identifica onde estão localizados 50% dos dados centrais das medidas. Um segmento de linha reta conecta o topo da caixa ao maior valor, enquanto outro segmento conecta a base da caixa ao menor valor observado, denominados *whiskers* ou fios de bigode. Os fios de bigode se estendem até os valores máximo e mínimo da série ou até atingir 1,5 vezes a diferença entre os quartis ( $Q_3 - Q_1$ ). Valores que excedem este

intervalo são considerados atípicos ou *outliers* e são marcados individualmente por um símbolo de + (TUKEY, 1977).



**Figura 3.12 - Diagrama de caixas.**

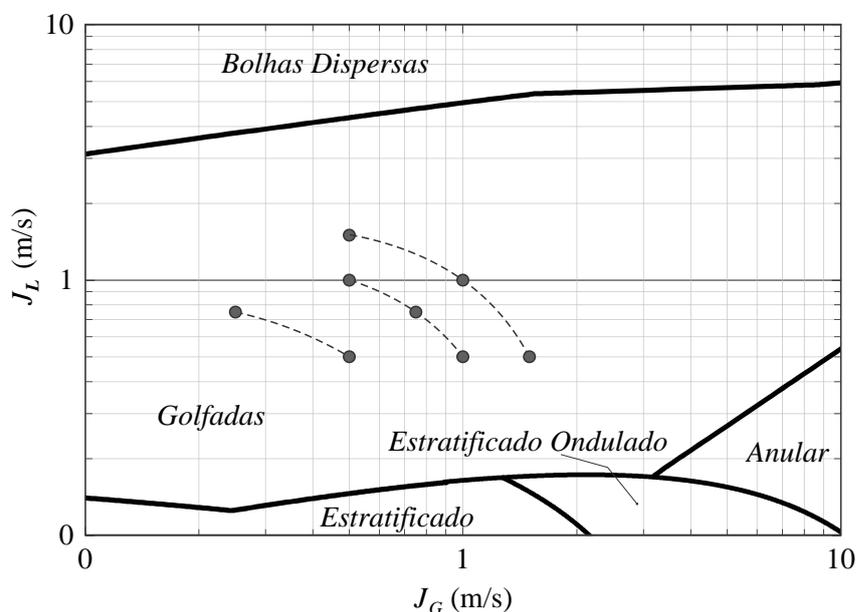
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os principais resultados e discussões dos parâmetros característicos do escoamento em golfadas provenientes das medições experimentais. O capítulo apresenta uma análise da repetitividade das medidas experimentais, seguido de uma análise visual do escoamento em golfadas através das imagens obtidas com a câmera de alta velocidade. A seguir, é apresentada uma discussão da influência das partículas nos parâmetros característicos das golfadas, apresentando as Funções de Densidade de Probabilidade e valores médios dos principais parâmetros, assim como correlações baseadas nas medidas experimentais. Por fim, é analisado o comportamento dos parâmetros da golfada ao longo das estações de medição para as concentrações de partículas analisadas.

### 4.1 Definição da grade de testes

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi estabelecida uma grade de testes com diferentes velocidades superficiais para a mistura ( $J$ ), levando em conta as limitações do circuito experimental e de forma que todas as medições se encontrem no padrão de escoamento em golfadas ao longo da tubulação horizontal. Foram escolhidas diferentes pares de velocidades superficiais de líquido ( $J_L$ ) e gás ( $J_G$ ) e concentrações, que aqui serão chamados de 'Ponto'. Os pontos escolhidos são apresentados na Tabela 4.1, sendo a numeração dos pontos identificada da seguinte maneira: os primeiros três dígitos apresentam o par  $J_G/J_L$  e o último dígito a concentração de partículas. A velocidade superficial de líquido foi variada entre 0,50 m/s e 1,50 m/s, enquanto a velocidade superficial de gás variou entre 0,25 m/s e 1,00 m/s. Para cada um dos pares  $J_L/J_G$  foi realizada uma medida de escoamento bifásico de líquido e gás (sem partículas dispersas) e escoamento em golfadas trifásico líquido-sólido-gás (com duas concentrações de partículas diferentes). Neste trabalho, foram utilizados: a água, como a fase líquida; o ar, como a fase gasosa; e partículas de polietileno com massa específica 938 kg/m<sup>3</sup> e 0,5 mm de tamanho, como a fase sólida. A concentração de partículas sólidas considerada foi de 6 g/dm<sup>3</sup>-água e 8 g/dm<sup>3</sup>-água. Na Figura 4.1 é apresentada a grade de testes para as diferentes combinações de velocidades superficiais no mapa de fluxo proposto por Taitel e Dukler (1976). Fica evidente que todos os pares  $J_L/J_G$  se encontram dentro do padrão de escoamento em golfadas, fato confirmado através da

visualização dos experimentos (lembrando que a tubulação de testes é fabricada em acrílico transparente).



**Figura 4.1 - Grade de testes no mapa de fluxo proposto por Taitel e Dukler (1976) para dutos horizontais.**

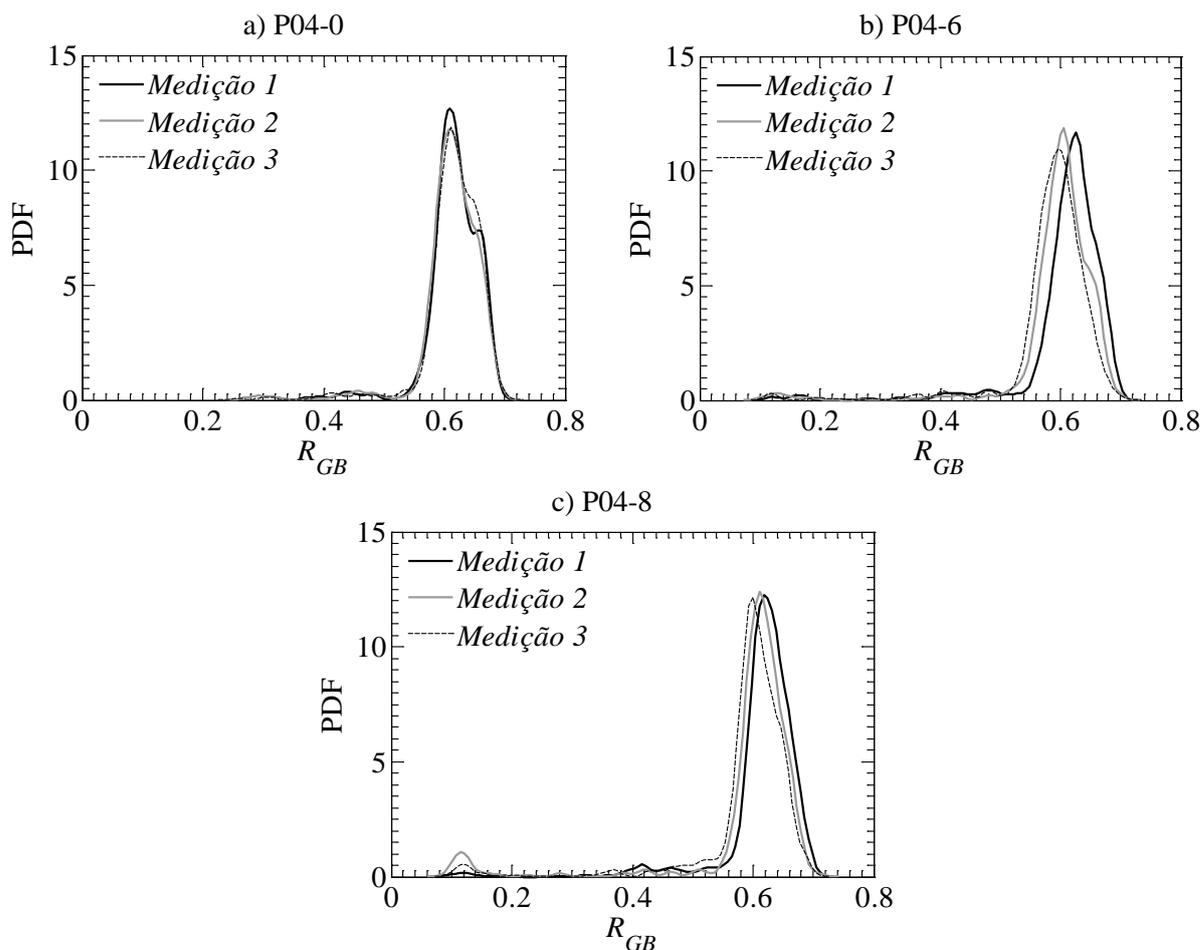
**Tabela 4.1 - Grade de testes**

0 g/dm <sup>3</sup> -água			6 g/dm <sup>3</sup> -água			8 g/dm <sup>3</sup> -água		
Ponto	$J_G$ (m/s)	$J_L$ (m/s)	Ponto	$J_G$ (m/s)	$J_L$ (m/s)	Ponto	$J_G$ (m/s)	$J_L$ (m/s)
P01-0	0,25	0,75	P01-6	0,25	0,75	P01-8	0,25	0,75
P02-0	0,50	0,50	P02-6	0,50	0,50	P02-8	0,50	0,50
P03-0	0,50	1,00	P03-6	0,50	1,00	P03-8	0,50	1,00
P04-0	0,75	0,75	P04-6	0,75	0,75	P04-8	0,75	0,75
P05-0	1,00	0,50	P05-6	1,00	0,50	P05-8	1,00	0,50
P06-0	0,50	1,50	P06-6	0,50	1,50	P06-8	0,50	1,50
P07-0	1,00	1,00	P07-6	1,00	1,00	P07-8	1,00	1,00
P08-0	1,50	0,50	P08-6	1,50	0,50	P08-8	1,50	0,50

## 4.2 Repetitividade das medidas

A fim de garantir a repetitividade das medidas experimentais, cada um dos pontos foi medido três vezes em dias diferentes. Dado que os sinais processados dos sensores resistivos são de frações de vazão ( $R_{GB}$ ), a repetitividade das medidas é então analisada utilizando funções densidade de probabilidade ( $PDF$ ) e diagramas de caixa para esta grandeza. Na

Figura 4.2 é apresentada uma comparação das *PDF's* das três medidas realizadas para as três concentrações de partículas. A estação 3 do ponto P04 é utilizada como exemplo, correspondente à velocidade superficial de gás e de líquido iguais a 0,75 m/s. Verifica-se que, para todas as concentrações, as distribuições da fração de vazio das três medições são semelhantes, indicando boa repetitividade das medidas e independência das datas.



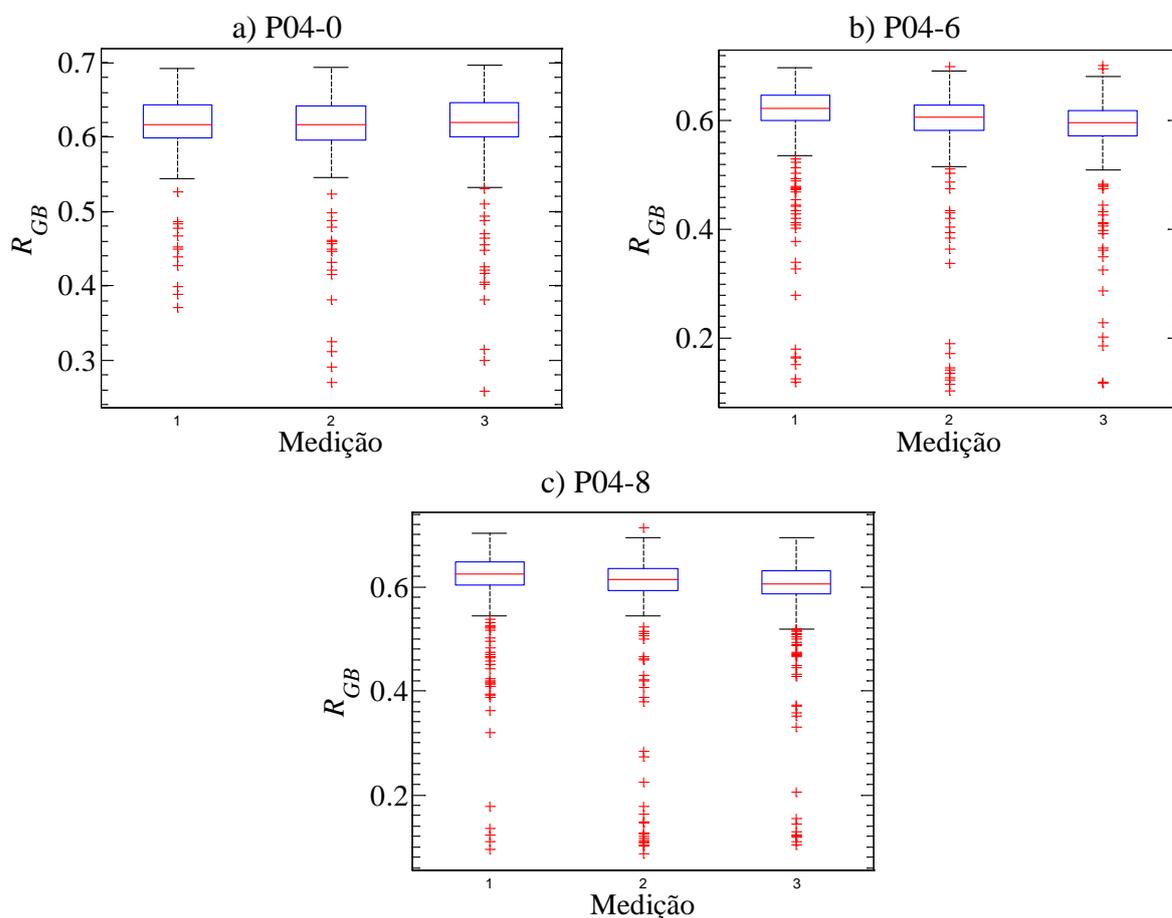
**Figura 4.2 - Função densidade de probabilidade da fração de vazio da bolha ( $R_{GB}$ ) para a estação 3 do ponto P04 para as três concentrações. a) 0 g/dm<sup>3</sup>-água, b) 6 g/dm<sup>3</sup>-água, c) 8 g/dm<sup>3</sup>-água.**

Essa semelhança é observada também na Figura 4.3, onde os diagramas de caixa apresentados para as três concentrações mostram valores de mediana, quartil 1 e quartil 3 muito parecidos. Para as concentrações analisadas e tomando como referência a medição 1, as medianas das medições 2 e 3 apresentam um desvio máximo de 4,42%, um mínimo de 0,11% e uma média de 2,09%. O quartil 1 e quartil 3 apresentam um desvio máximo de 4,62%, um mínimo de 0,10% e uma média de 2,10%. Os desvios máximos são observados para testes

realizados com partículas (b, c das Figura 4.2 e Figura 4.3), o que possivelmente está atrelado a ruídos gerados por partículas que colidem com os fios do sensor resistivo.

A análise de repetitividade baseada na estação 3 do ponto P04, conforme apresentado nas Figura 4.2 e Figura 4.3, se estende para todos os outros pontos da grade de testes, para todas as estações de medição e para todas as concentrações.

De forma geral, os resultados mostrados apresentam muita similaridade. Assim, pode-se concluir que a utilização de uma das medições fornece informação consistente do escoamento, suficiente para analisar os parâmetros da golfada. Portanto, as análises do presente trabalho serão realizadas apenas utilizando uma das três medições.



**Figura 4.3 - Diagrama de caixa da fração de vazio para a estação 3 do ponto P04 para as três concentrações. a) 0 g/dm<sup>3</sup>-água, b) 6 g/dm<sup>3</sup>-água, c) 8 g/dm<sup>3</sup>-água.**

### 4.3 Visualização do escoamento em golfadas

Nesta seção é apresentada uma análise qualitativa do escoamento em golfadas com partículas através das imagens obtidas com a câmera de alta velocidade. Porém, antes de começar a analisar as imagens, é importante entender quais são as diferenças introduzidas pelas partículas no escoamento em golfadas. Os principais efeitos gerados pela introdução de partículas no escoamento em golfadas podem ser separados em:

- (i) Aumento da velocidade superficial da mistura: os parâmetros fixados nas medidas experimentais foram as velocidades superficiais de líquido ( $J_L$ ) e de gás ( $J_G$ ). Porém, a presença de um escoamento particulado está associada à introdução da velocidade superficial do sólido ( $J_S$ ). Shoham (2006) mostra que, para o caso de um escoamento sem deslizamento, a fração volumétrica de partículas dentro do líquido pode ser aproximada pela razão entre as velocidades superficiais do sólido e do líquido,  $R_{S/L} = J_S / J_L$ . Esta hipótese é razoável para escoamentos particulados homogêneos e quando a diferença de massa específica entre a partícula e o meio líquido contínuo é pequena, que é justamente o caso deste trabalho. Isolando a velocidade superficial de sólido, a mesma pode ser estimada como  $J_S = R_{S/L} J_L$ .

Shoham (2006) ainda afirma que a velocidade superficial da mistura é a soma da velocidade superficial de todas as fases presentes no escoamento,  $J = J_L + J_G + J_S$ . Como as velocidades superficiais de líquido e gás foram mantidas constantes, mas a fração volumétrica  $R_{S/L}$  de partículas nos sólidos (equivalente à concentração volumétrica das partículas, no caso de não-deslizamento) foi variada, então a variação na velocidade superficial da mistura é referente ao valor absoluto da velocidade superficial de sólido,  $\Delta J \approx J_S = R_{S/L} J_L$ . Como os valores de  $R_{S/L}$  e  $J_L$  são necessariamente positivos, então a introdução de partículas sempre acarretará em uma aceleração da mistura.

- (ii) Mudança de propriedades: a dispersão homogênea de partículas pode ser tratada como uma fase líquida de propriedades homogêneas e dependentes da concentração de partículas. Ou seja, o escoamento trifásico sólido-líquido-gás pode ser tratado como um escoamento bifásico dispersão-gás, porém

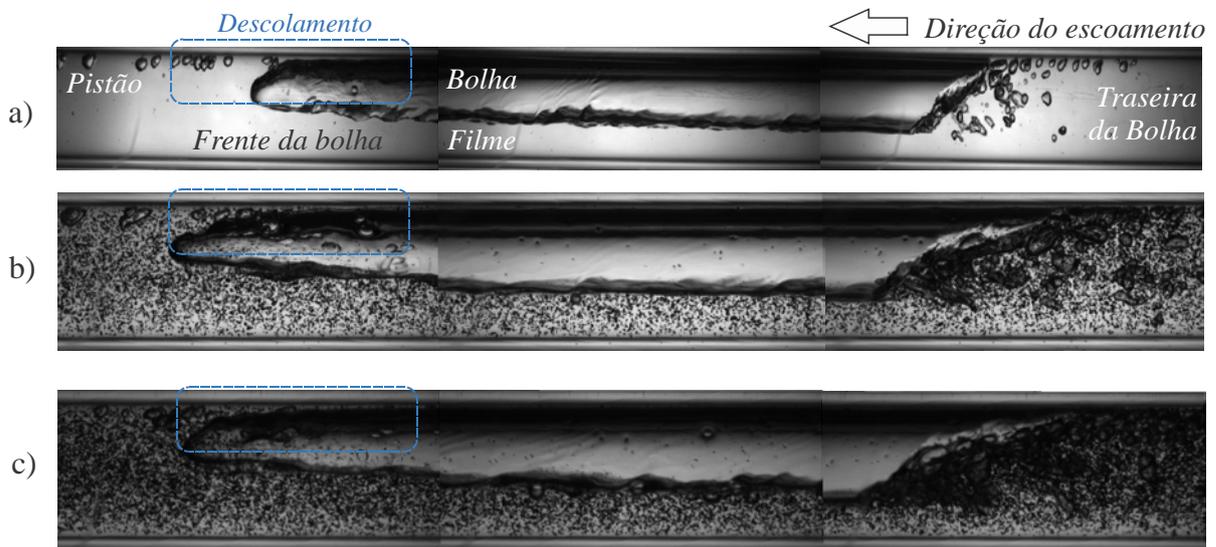
substituindo as propriedades da fase líquida pura pelas propriedades da dispersão.

A massa específica da dispersão, que por sua vez é referente à inércia do escoamento, irá mudar em função da concentração de partículas. Seguindo o modelo homogêneo conforme apresentado por Shoham (2016), a massa específica da dispersão pode ser calculada como  $\tilde{\rho}_L = \rho_S R_{S/L} + \rho_L (1 - R_{S/L})$ . O sinal  $(\tilde{\bullet})_L$  é a representação adotada para a dispersão, sendo que o subíndice  $L$  indica que a dispersão se comporta como uma fase líquida homogênea, enquanto o til ( $\sim$ ) representa um pseudo-líquido, uma dispersão.

A viscosidade da dispersão também é função da concentração de partículas, porém não pode ser estimada através de um modelo homogêneo. Ao invés disso, prefere-se adotar a correlação empírica de Krieger e Dougherty (1959),  $\tilde{\mu}_L = \mu_L (1 - R_{S/L}/0,63)^{-1,575}$ . Esta correlação é válida para partículas esféricas com um fator de empacotamento máximo de 0,63.

(iii) Interferência das partículas no escoamento líquido-gás: as partículas sólidas estão sujeitas a peso, empuxo, forças de arrasto e cisalhamento em sua superfície. Caso ocorra uma associação de movimentos de translação e rotação das partículas, as mesmas podem estar sujeitas a forças devido à mudança de distribuição de pressão ao redor da sua superfície, fenômeno conhecido como *efeito Magnus* (PANTON, 2013). Todas essas forças podem resultar em um movimento relativo entre a partícula e o meio líquido contínuo. Apesar de ser considerado que, macroscopicamente, as partículas não possuem deslizamento em relação ao líquido (ou seja, que na média, ambas as fases se deslocam com mesma velocidade); ao analisar-se o comportamento de uma partícula em relação ao meio líquido, a mesma possui um movimento relativo, mesmo que em sua média todo o conjunto de partículas viaje com a mesma velocidade da fase líquida. Esse movimento relativo entre partícula e fluido, aliado à diferença de massa específica entre o sólido e o líquido (que, apesar de pequena, é existente), irá gerar vórtices no escoamento, que localmente afetará o perfil de velocidades. A mudança no perfil de velocidades, por sua vez, está atrelada ao formato da frente e da traseira da bolha alongada.

As imagens obtidas com a câmera de alta velocidade foram analisadas levando em consideração os efeitos introduzidos pelas partículas no escoamento de líquido e gás em golfadas. A Figura 4.4 apresenta imagens do escoamento intermitente para o ponto P05 ( $J_G = 1 \text{ m/s}$  e  $J_L = 0,5 \text{ m/s}$ ) na estação 2. A Figura 4.4 apresenta uma montagem de três imagens capturadas pela câmera de alta velocidade, respectivamente para a frente, o corpo e a traseira da bolha alongada. Imagens para as duas concentrações de partículas (Figura 4.4b, c) são comparadas com o escoamento em golfadas sem partículas (Figura 4.4a). É importante ressaltar que a distribuição de partículas no líquido é homogênea para ambas as concentrações.



**Figura 4.4 -** Imagens do escoamento em golfadas para o ponto P05 na estação 2, analisadas para as três concentrações. a)  $0 \text{ g/dm}^3$ , b)  $6 \text{ g/dm}^3$  e c)  $8 \text{ g/dm}^3$ .

A introdução de  $8 \text{ g/dm}^3$  ( $R_{s/L} \approx 0,0085$ ) de material particulado no escoamento de líquido e gás do ponto P05 ( $J_G = 1 \text{ m/s}$  e  $J_L = 0,5 \text{ m/s}$ ) gera variação de velocidades superficial da mistura de  $\Delta J \approx 0,008 \text{ m/s}$  (aproximadamente 0,5% de aceleração da mistura). Nesse ponto, estima-se que a dispersão possui massa específica de  $\tilde{\rho}_L \approx 994 \text{ kg/m}^3$  (aproximadamente 0,1% menor que a massa específica da fase líquida contínua) e viscosidade de  $\tilde{\mu}_L \approx 8,9 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$  (aproximadamente 2% maior que a viscosidade da fase líquida contínua).

Da Figura 4.4, pode-se observar que a frente da bolha tem uma forma cilíndrica, com um perfil aerodinâmico, sendo que a frente da bolha tende a escoar levemente descolada da

parte superior da tubulação (linhas tracejadas de cor azul). Esse descolamento é levemente acentuado na presença de maiores concentrações de partículas (Figura 4.4b,c). Segundo Taitel e Barnea (1990a), o perfil da bolha alongada segue de um balanço de quantidade de movimento combinado entre a fase líquida e a fase gasosa. Os autores propõem a seguinte equação diferencial para a altura do filme de líquido ao longo do comprimento da bolha alongada:

$$\frac{dh_{LB}}{dz} = \frac{\overbrace{\frac{\tau_{LB} S_{LB}}{A_{LB}}}^{\text{atrito no filme}} - \overbrace{\frac{\tau_{GB} S_{GB}}{A_{GB}}}^{\text{atrito na bolha}} - \overbrace{\tau_i S_i \left( \frac{1}{A_{LB}} + \frac{1}{A_{GB}} \right)}^{\text{atrito na interface}} + \overbrace{(\rho_L - \rho_G) g \sin \theta}^{\text{peso}}}{\underbrace{(\rho_L - \rho_G) g \cos \theta}_{\text{inclinação da interface}} - \left( \underbrace{\rho_L \frac{|U_{LB} - U_T|(U_{LB} - U_T)}{R_{LB}}}_{\text{inércia do filme}} + \underbrace{\rho_G \frac{|U_{GB} - U_T|(U_{GB} - U_T)}{R_{GB}}}_{\text{inércia da bolha}} \right) \frac{dR_{LB}}{dh_{LB}}} \quad (4.1)$$

sendo  $\tau_{LB}$ ,  $\tau_{GB}$  e  $\tau_i$  as tensões de cisalhamento entre o filme e a parede, entre a bolha alongada e a parede e na interface entre as duas fases, respectivamente;  $S_{LB}$ ,  $S_{GB}$  e  $S_i$  representam os respectivos perímetros molhados no qual a tensão de cisalhamento atua;  $A_{LB}$  e  $A_{GB}$  são a área de seção transversal ocupada pelo filme e pela bolha alongada, respectivamente;  $U_{LB}$  e  $U_{GB}$  representam as respectivas velocidades médias nessa região; e  $R_{LB}$  e  $R_{GB}$  as respectivas frações volumétricas de fase. Na Eq. (4.1) ainda foram indicados os significados físicos dos termos do balanço de quantidade de movimento, sendo eles devido: ao atrito, ao peso, à inclinação da interface e à inércia das fases.

Analisando a Eq. (4.1), percebe-se que a concentração de partículas afeta o perfil da bolha alongada devido à mudança na massa específica da dispersão, assim como na sua viscosidade (implícito nas tensões de cisalhamento). Além disso, a mudança na velocidade superficial da mistura afetará as velocidades locais do filme e da bolha alongada, que por sua vez afetarão os termos de inércia e de atrito (a velocidade local está implícita dentro das tensões de cisalhamento<sup>2</sup>). Por fim, a interferência das partículas no perfil de velocidades na região traseira do pistão, logo à frente da bolha alongada, pode causar uma mudança na característica do nariz da bolha. Esses efeitos combinados podem explicar o descolamento da frente da bolha alongada na presença de maiores concentrações de partículas.

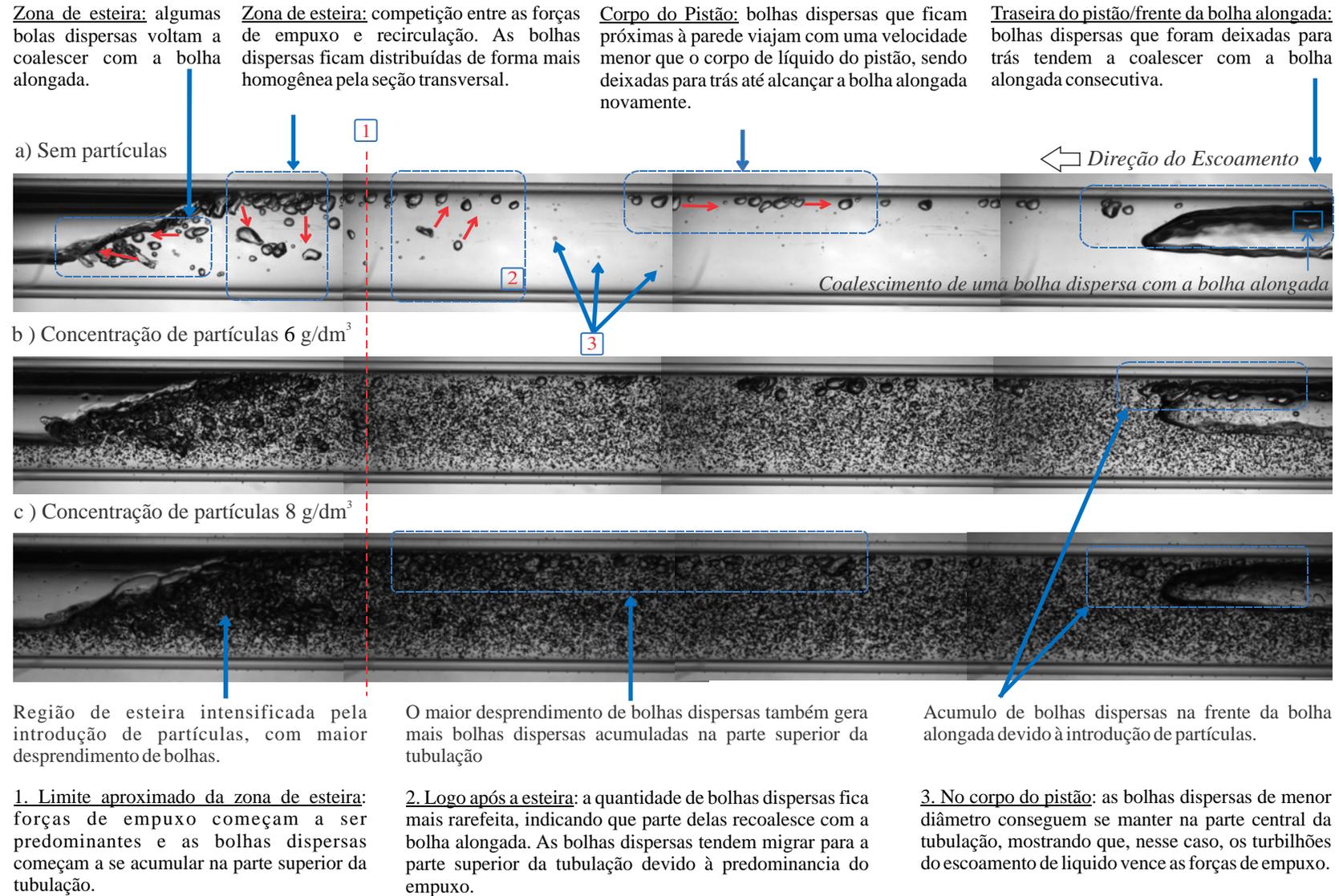
<sup>2</sup> Segundo Taitel e Barnea (1990a), as tensões de cisalhamento no filme, na bolha e na interface podem ser calculadas respectivamente por  $\tau_{LB} = f_{LB} (\rho_L |U_{LB}| U_{LB} / 2)$ ,  $\tau_{GB} = f_{GB} (\rho_G |U_{GB}| U_{GB} / 2)$ ,  $\tau_i = f_i (\rho_G |U_{GB} - U_{LB}| (U_{GB} - U_{LB}) / 2)$ .

A Figura 4.5 apresenta uma montagem similar à Figura 4.4, porém para a região do pistão. São apresentadas as mesmas condições, isso é, ponto P05 ( $J_G = 1$  m/s e  $J_L = 0,5$  m/s) para as duas concentrações (6 e 8 g/dm<sup>3</sup>) e para o escoamento sem partículas. Percebe-se que a introdução do material particulado aumenta a quantidade de bolhas desprendidas da traseira da bolha alongada, região conhecida como esteira. Nesta região, existe uma zona de recirculação devido à diferença de velocidades entre o pistão e o filme. Como o pistão normalmente se translada mais rápido que o filme, o mesmo captura líquido do filme, processo conhecido como *scooping* (SHOHAM, 2006). A captura de líquido em velocidades diferentes causa uma mudança local no vetor velocidade, gerando uma zona de recirculação e um ressalto hidráulico, característico da traseira da bolha alongada.

As bolhas dispersas que se desprendem da traseira da bolha alongada podem apresentar duas trajetórias distintas. No primeiro caso, a bolha dispersa recircula, seguindo os turbilhões nessa zona, voltando a entrar em contato com a traseira da bolha alongada e podendo recoallescer com a mesma. No segundo caso, a bolha dispersa consegue vencer a zona de recirculação e atinge o corpo do pistão. Quando a bolha dispersa atinge o corpo do pistão, as forças de empuxo prevalecem sobre as forças de origem turbulenta, fazendo com que as bolhas dispersas se acumulem na região superior da parede. Apenas as bolhas dispersas de diâmetro realmente pequeno permanecem estáveis no centro da tubulação, indicando que, nesse caso, a força de origem turbulenta predomina sobre a força de empuxo.

As bolhas dispersas maiores, que se acumulam na parte superior da tubulação, acabam por viajar com uma velocidade inferior à velocidade do líquido na região central da tubulação. Logo, estas bolhas dispersas começam a ser deixadas para trás, até atingirem a bolha alongada consecutiva.

A introdução de partículas aumenta a intensidade de recirculação na zona de esteira da bolha alongada devido a sua interação com o perfil de velocidade do líquido, causando um aumento das tensões de cisalhamento e consequente um maior desprendimento de bolhas dispersas. Apesar da distinção visual entre as partículas e bolhas dispersas não ser muito clara na região da esteira, percebe-se da Figura 4.5 que uma maior quantidade de bolhas dispersas se acumula na região superior da tubulação após a zona de esteira, indicando que realmente existe um maior desprendimento de bolhas dispersas na zona de esteira. Essa evidencia



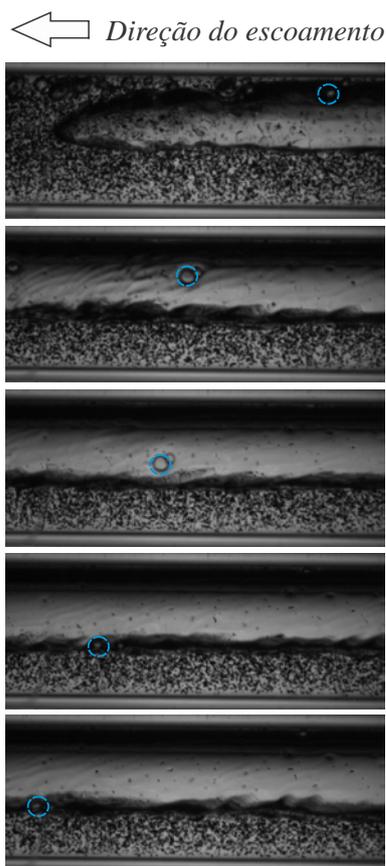
**Figura 4.5 - Imagens capturadas pela câmera de alta velocidade para o ponto P05 ( $J_G = 1$  m/s e  $J_L = 0,5$  m/s) para concentrações de partícula: a) 0 g/dm<sup>3</sup>, b) 6 g/dm<sup>3</sup> e c) 8 g/dm<sup>3</sup>.**

é novamente verificada devido ao acúmulo de bolhas dispersas na frente da bolha alongada consecutiva nos casos em que o material particulado foi inserido. Este ponto de acúmulo de bolhas dispersas encontra-se em um ponto de estagnação acima da ponta do nariz da bolha.

As bolhas dispersas que são deixadas para trás e atingem a bolha alongada consecutiva podem ter duas trajetórias distintas:

- i. Coalescimento da bolha dispersa com a bolha alongada consecutiva, caracterizando um mecanismo de troca de massa de gás entre duas células unitárias vizinhas.
- ii. Não coalescimento entre a bolha dispersa e a bolha alongada. Nesse caso, a bolha dispersa tende a migrar da parte superior da tubulação para a inferior, contornando a bolha alongada, até chegar na interface entre o líquido e o gás. Isto pode ser observado pelos círculos azuis da Figura 4.6 para vários instantes de tempo capturados pela câmera durante a passagem da frente de uma bolha alongada. Essa bolha dispersa tende a permanecer na interface entre a bolha e o filme e pode, em algum momento, coalescer com a bolha alongada. Caso o coalescimento não ocorra, a tendência é que esta bolha dispersa no filme seja deixada para trás, até ser incorporada pelo pistão consecutivo.

O mecanismo (i) mostrou-se predominante para o escoamento puramente bifásico, enquanto a presença do mecanismo (ii) foi significativa no caso de escoamento com partículas. Isto aponta a que a presença do material particulado retarda a coalescência, que por sua vez pode estar relacionado à variação da tensão superficial ou interação capilar entre a partícula e a interface gás-líquido. Uma análise mais aprofundada deve ser feita para entender o que está causando o retardamento da coalescência - se a tensão superficial ou forças capilares - e imagens mais próximas das partículas provavelmente será necessária.



**Figura 4.6 - Caminho percorrido da bolha que não coalesceu.**

#### **4.4 Análise dos parâmetros característicos das golfadas**

Nesta seção são avaliados os parâmetros característicos das golfadas de uma forma quantitativa, buscando-se relacionar a influência das partículas com aquilo que foi observado qualitativamente na seção anterior. A análise é feita a partir das Funções Densidade de Probabilidade e dos valores médios, visando avaliar o comportamento da velocidade da frente da bolha, da frequência e dos comprimentos do pistão e da bolha. Finalmente, é realizado um ajuste dos parâmetros, através do método de mínimos quadrados, procurando correlações que expressem os valores medidos.

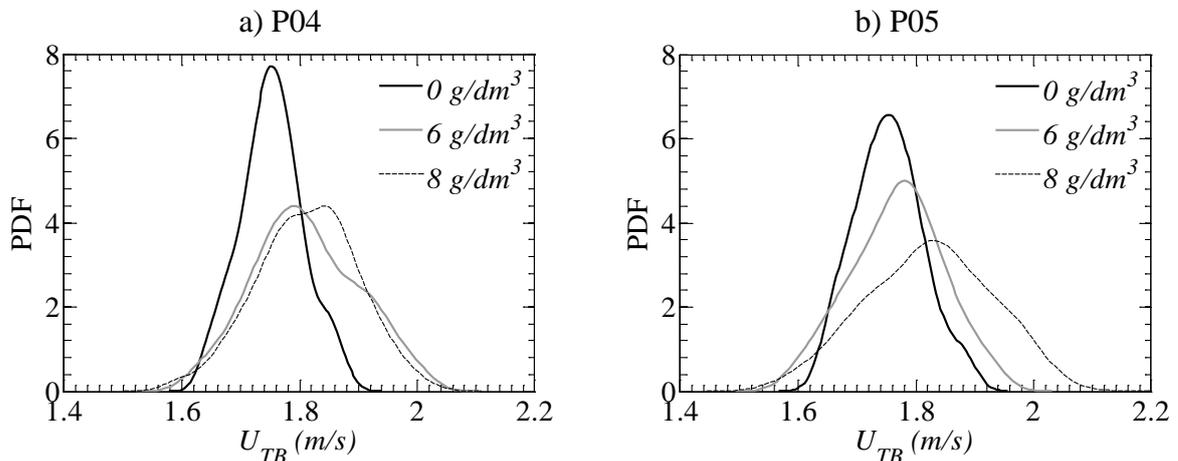
##### **4.4.1 Velocidade da frente da bolha**

Uma análise das velocidades da frente da bolha mostrou um aumento da velocidade com o acréscimo da concentração de partículas, concordando com as imagens observadas na seção anterior.

A substituição do líquido puro por uma dispersão de partículas no líquido levou a um aumento na velocidade da frente da bolha. As partículas utilizadas possuem massa específica similar à da água, o que resulta em uma dispersão com densidade muito parecida ao líquido puro. Adicionalmente, como mostrado na seção de visualização a inserção de partículas gera uma mistura com velocidade superficial maior. Fazendo analogia a um escoamento puramente bifásico de líquido e gás, o escoamento em golfadas na presença das partículas apresenta uma maior inércia, conseqüentemente, uma velocidade de mistura maior. Estudos experimentais, tais como Vicencio (2013), mostram que a velocidade da frente da bolha aumenta com o aumento da velocidade de mistura.

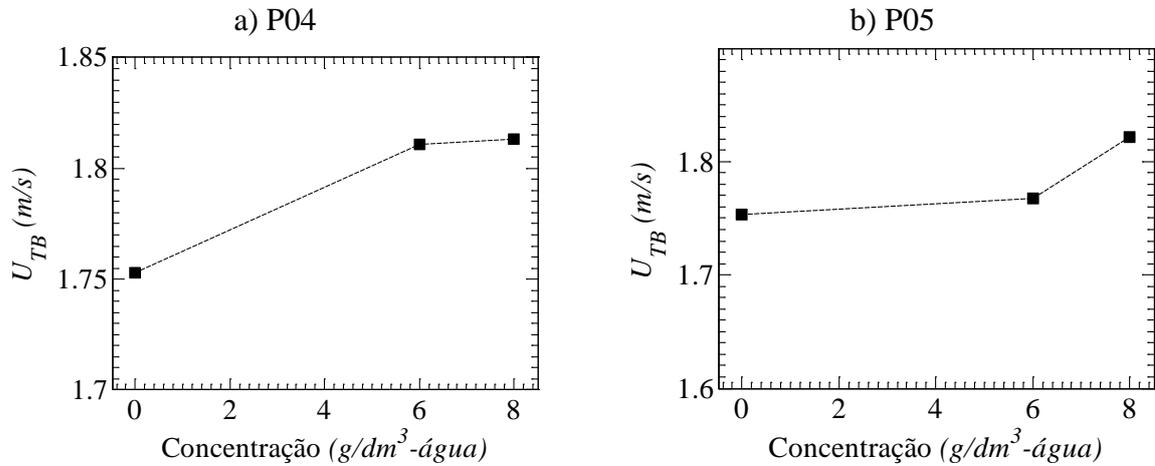
A Figura 4.7 apresenta Funções Densidade de Probabilidade (PDF) para os pontos P04 ( $J_L=0,75$  m/s e  $J_G=0,75$  m/s) e P05 ( $J_L=1,00$  m/s e  $J_G=0,50$  m/s) extraídas para as três concentrações na estação 2. Cabe ressaltar que  $0$  g/dm<sup>3</sup>-água indica um escoamento em golfadas líquido-gás sem partículas.

A introdução das partículas resulta em uma aceleração da frente da bolha alongada. O incremento é mostrado com um deslocamento da distribuição para a direita no eixo de velocidades, como indicado na Figura 4.7.



**Figura 4.7 - Função Densidade de Probabilidade da velocidade da frente da bolha na estação 2 para os pontos P04 e P05 nas concentrações de  $0$  g/dm<sup>3</sup>-água,  $6$  g/dm<sup>3</sup>-água,  $8$  g/dm<sup>3</sup>-água.**

Um gráfico de valores médios da velocidade da frente da bolha é apresentado na Figura 4.8. Os valores médios confirmam a tendência observada nas funções densidade de probabilidade, mostrando um incremento com o aumento da concentração de partículas. Os valores médios de  $U_{TB}$  dos pontos mostrados na Figura 4.8 são apresentados na Tabela 4.2.



**Figura 4.8 - Valores médios da velocidade da frente da bolha na estação 2 para os pontos P04 e P05 nas três concentrações de partículas.**

**Tabela 4.2 - Valores médios da velocidade da frente da bolha para as três concentrações de partículas na estação 2.**

Ponto	$J_G$ (m/s)	$J_L$ (m/s)	Concentração (g/dm <sup>3</sup> -água)	$U_{TB}$ (m/s)
P04	0,75	0,75	0	1,7528
			6	1,8108
			8	1,8131
P05	1,00	0,50	0	1,7536
			6	1,7628
			8	1,8219

A fim de estabelecer uma relação entre o observado para a velocidade da frente da bolha e as velocidades superficiais, é utilizada a metodologia de Nicklin et al. (1962). Conforme proposto por Vicencio (2013) e Rodrigues (2015), a Eq. (2.9) pode ser reescrita em sua forma adimensional, obtendo-se:

$$\frac{U_{TB}}{\sqrt{gD}} = C_0 Fr_J + C_\infty \quad (4.2)$$

Os coeficientes  $C_0$  e  $C_\infty$  são constantes adimensionais que quantificam a influência da movimentação do líquido na frente da bolha e velocidade de translação de uma bolha em líquido estagnado, respectivamente (TAITEL e BARNEA, 1990a). Na Figura 4.9 são apresentados os dados medidos de velocidade da frente da bolha em função do número de Froude de mistura juntamente com os ajustes sugeridos no formato da Eq. (4.2). Os valores

dos coeficientes  $C_0$  e  $C_\infty$ , dos ajustes são apresentados na Tabela 4.3. Além disso, são indicados os coeficientes de determinação  $R^2$  para cada caso.

**Tabela 4.3 - Coeficientes do ajuste linear para a velocidade da frente da bolha.**

Concentração (g/dm <sup>3</sup> -água)	$C_0$	$C_\infty$	$R^2$
0	1,17	0	0,9971
6	1,19	0,02	0,9988
8	1,20	0,01	0,9993

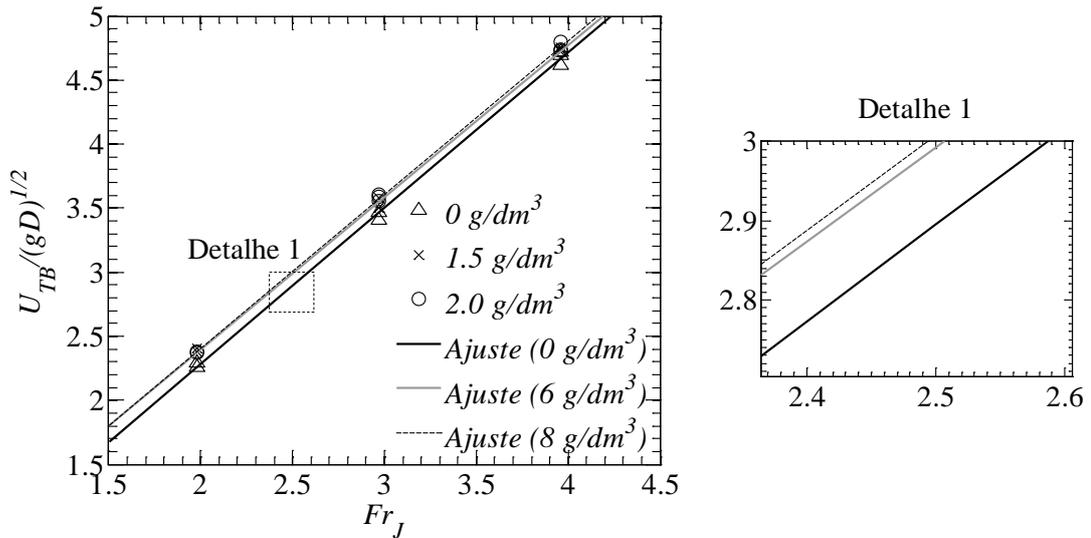
O coeficiente de determinação  $R^2$  é uma medida da qualidade do ajuste dos valores observados, indicando o quanto o modelo foi capaz de explicar os valores coletados. O valor de  $R^2$  varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 estiver o coeficiente de determinação, melhor será o grau de ajuste.

Como mostrado na Tabela 4.3, os coeficientes de correlação ficaram próximos de 1, indicando boa concordância entre a variável independente ( $Fr_j$ ) e a variável dependente ( $U_{TB}/(gD)^{1/2}$ ) da Eq. (4.1).

A linha de tendência indica uma relação direta entre a velocidade da frente da bolha e a velocidade de mistura.

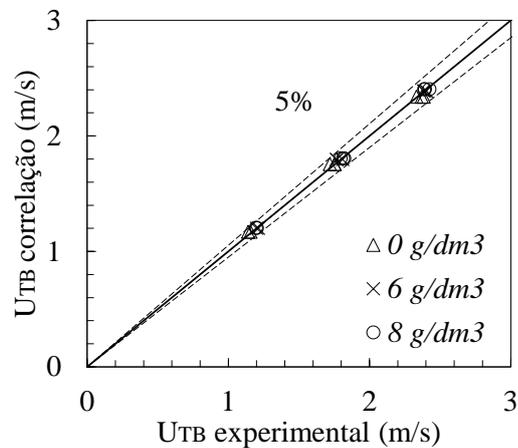
A partir da Tabela 4.3 observa-se valores de  $C_0$  em torno a 1,2 para 0 g/dm<sup>3</sup>-água, o que está de acordo com o obtido por Nydal et al. (1992).

Na Figura 4.9, uma ampliação das linhas de ajuste é indicada no “Detalhe 1”, mostrando que os três ajustes são paralelos, distribuídos de forma que, quanto maior a concentração de partículas, maior é a velocidade da frente da bolha alongada. A tendência está em concordância com o observado na Figura 4.7 de distribuições de probabilidade e na Figura 4.8 de valores médios.



**Figura 4.9 - Comparação dos ajustes da velocidade da frente da bolha para diferentes concentrações de partículas.**

A partir da Eq. (4.2), encontra-se uma expressão para a velocidade da frente da bolha, estes valores são comparados com valores experimentais, conforme mostrado na Figura 4.10. Os resultados mostraram um desvio de  $\pm 5\%$ .



**Figura 4.10 - Comparação entre a velocidade da frente da bolha estimada pela correlação e os dados experimentais, para as três concentrações de partículas.**

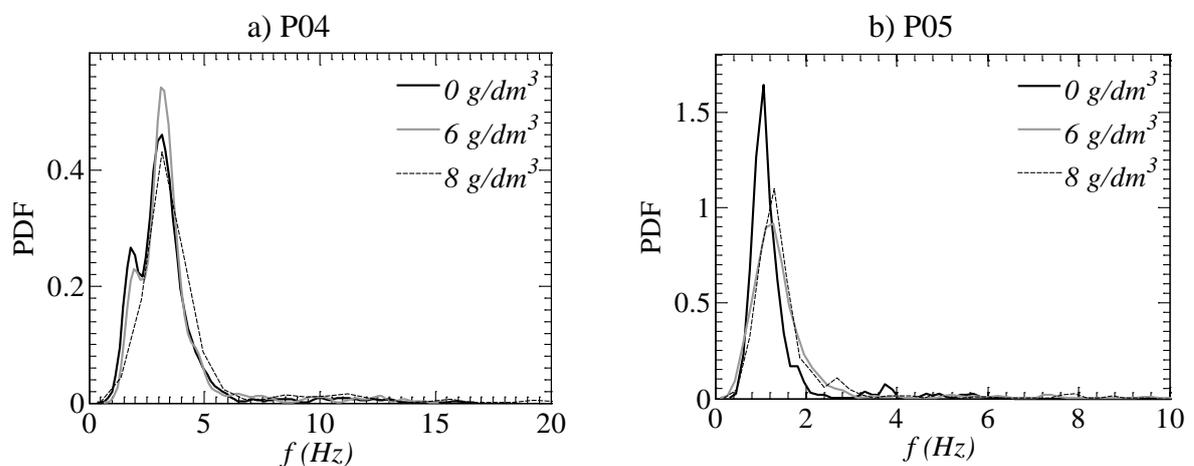
#### 4.4.2 Frequência da passagem da célula unitária

Outro parâmetro importante a ser analisado é a frequência de passagem da célula unitária, também conhecido como frequência do escoamento em golfadas. Na Figura 4.11 são apresentadas as Funções Densidade de Probabilidade (PDF) das frequências referentes à estação 2 dos pontos P04 e P05 para as diferentes concentrações de partículas. Observa-se nas

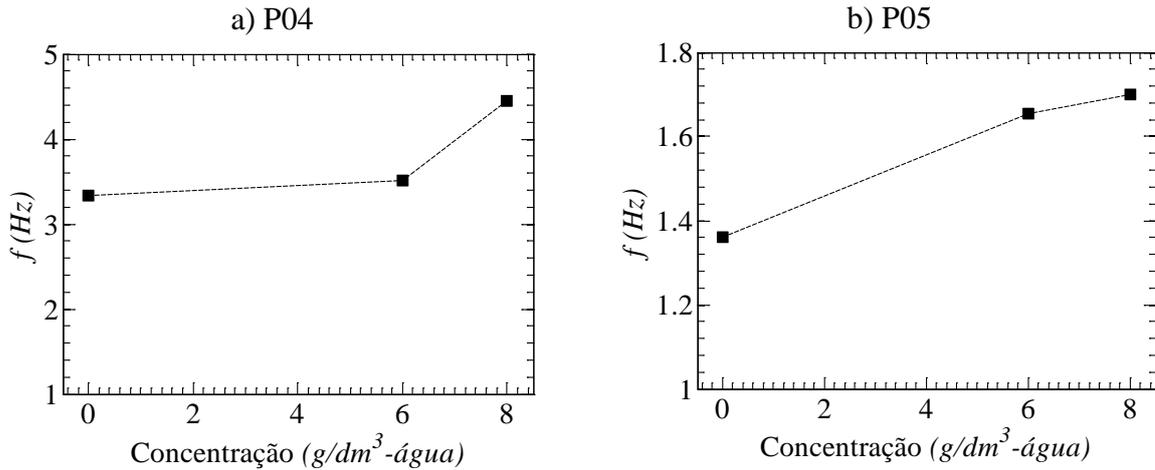
PDF para  $0 \text{ g/dm}^3$  uma distribuição menos simétrica com valores de frequência mais concentrados para o lado esquerdo da distribuição. Essa tendência indica a maior quantidade de células unitárias que passam lentamente por uma seção transversal do duto. Diversos autores ajustaram esse comportamento através de uma função log-normal, tais como Vicencio (2013) e Rodrigues (2015). Essa tendência também foi observada para as outras concentrações analisadas.

Observa-se que há um incremento da frequência com o aumento da concentração. Esse comportamento está de acordo com o observado na seção anterior, na qual se constatou um aumento da velocidade da frente da bolha com o aumento da concentração de partículas. Desse modo, aumentando-se  $U_{TB}$  tende-se a aumentar o valor de  $f$ . Ainda na Figura 4.11, o incremento da frequência é notado através de um leve deslocamento da distribuição para o lado direito do eixo de frequências para concentrações maiores de partículas.

A Figura 4.12 e a Tabela 4.4 apresentam os valores médios da frequência de passagem da célula unitária dos pontos P04 e P05. É possível notar, assim como na Figura 4.11, o aumento da frequência com o aumento da concentração de partículas.



**Figura 4.11 - Função Densidade de Probabilidade da frequência do escoamento em golfadas na estação 2 para os pontos P04 e P05 nas concentrações de  $0 \text{ g/dm}^3$ -água,  $6 \text{ g/dm}^3$ -água,  $8 \text{ g/dm}^3$ -água.**



**Figura 4.12 – Valores médios da frequência de passagem da célula unitária na estação 2 para os pontos P04 e P05 nas três concentrações de partículas.**

**Tabela 4.4 - Valores médios da frequência de passagem da célula unitária para as três concentrações de partículas na estação 2.**

Ponto	$J_G$ (m/s)	$J_L$ (m/s)	$J$ (m/s)	Concentração (g/dm <sup>3</sup> -água)	$f$ (Hz)
P04	0,75	0,75	1,50	0	3,3354
				6	3,5158
				8	4,4530
P05	1,00	0,50	1,50	0	1,3618
				6	1,6550
				8	1,7004

A frequência pode ser escrita em sua forma adimensional utilizando o número de Strouhal, definido como:

$$St = \frac{fD}{J_G} \quad (4.3)$$

Segundo Vicencio (2013) e Rodrigues (2015), a frequência pode ser ajustada por uma função exponencial de  $J_L/J$  (relação entre a velocidade superficial do líquido e da mistura), conforme:

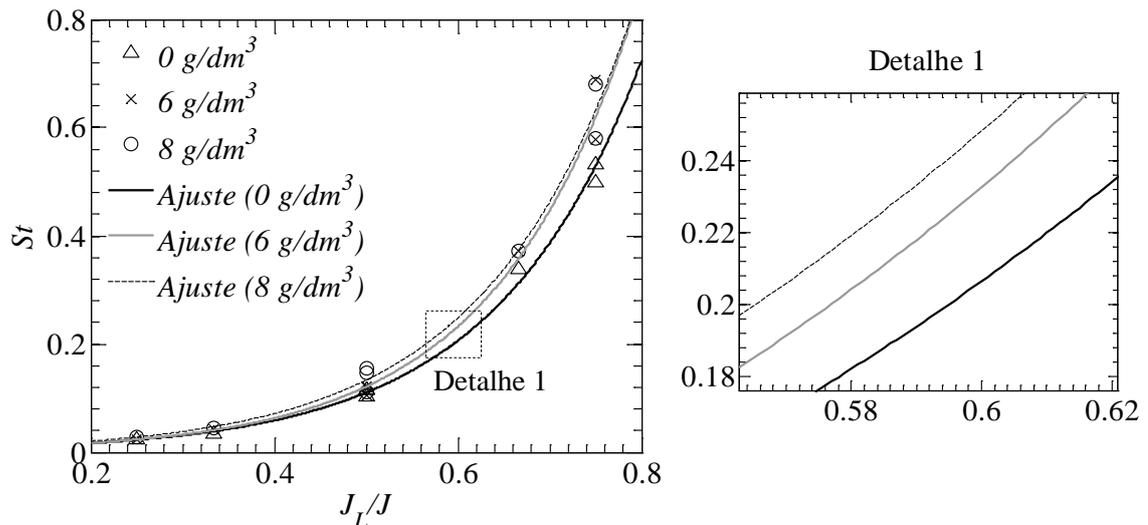
$$St = a \cdot \exp\left(b \frac{J_L}{J}\right) \quad (4.4)$$

Utilizando os dados obtidos experimentalmente, os coeficientes  $a$  e  $b$  foram determinados através do Método dos Mínimos Quadrados. Os valores obtidos, juntamente com seus respectivos coeficientes de determinação, são apresentados na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 - Coeficientes do ajuste exponencial para o número de Strouhal.**

Concentração (g/dm <sup>3</sup> -água)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
0	0,0058	5,995	0,9953
6	0,0042	6,698	0,9862
8	0,0062	6,159	0,9860

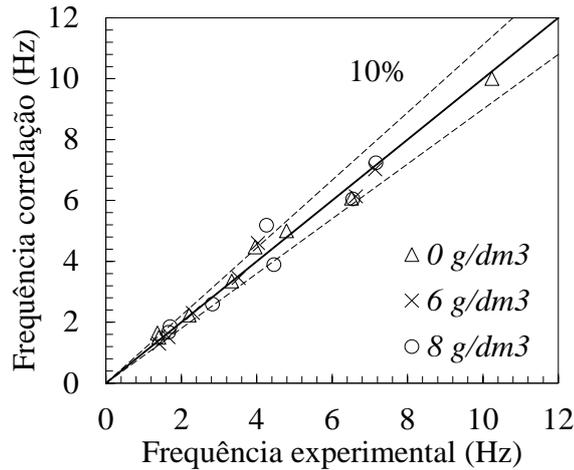
Na Figura 4.13 é apresentado o comportamento do número de Strouhal em função da razão  $J_L/J$ . Os dados experimentais são apresentados através de pontos e os ajustes da Eq. (4.2) através de linhas. São apresentados os casos para as três concentrações diferentes. Uma ampliação do ajuste é indicada no “Detalhe 1”, mostrando uma boa concordância entre os dados experimentais e o ajuste utilizado, comprovando o que havia sido mostrado com os coeficientes de determinação na Tabela 4.5.

**Figura 4.13 - Comparação dos ajustes do número de Strouhal para diferentes concentrações de partículas.**

Combinando as Eqs. (4.3) e (4.4), encontra-se uma correlação experimental para a frequência:

$$f = a \frac{J_G}{D} \exp\left(b \frac{J_L}{J}\right) \quad (4.5)$$

A Figura 4.14 apresenta a comparação entre a frequência avaliada pela Eq. (4.5) em relação aos dados experimentais. Observa-se uma acurácia de  $\pm 10\%$ .



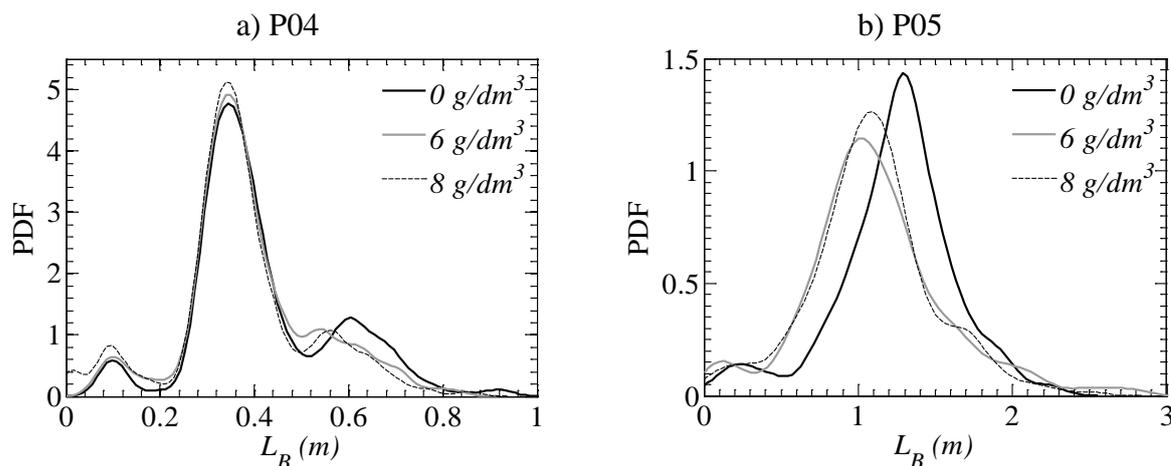
**Figura 4.14 - Comparação entre a frequência estimada pela correlação e os dados experimentais, para as três concentrações de partículas.**

#### 4.4.3 Comprimento da bolha

Os valores de comprimento de bolha são apresentados na Figura 4.15 (a) e (b) através de Funções Densidade de Probabilidade para os pontos P04 e P05 na estação 2 para as três concentrações. As distribuições são aproximadamente simétricas e alguns autores sugerem o seu ajuste a partir de uma curva normal, o que reflete de maneira satisfatória os dados da PDF (VICENCIO, 2013; RODRIGUES, 2015).

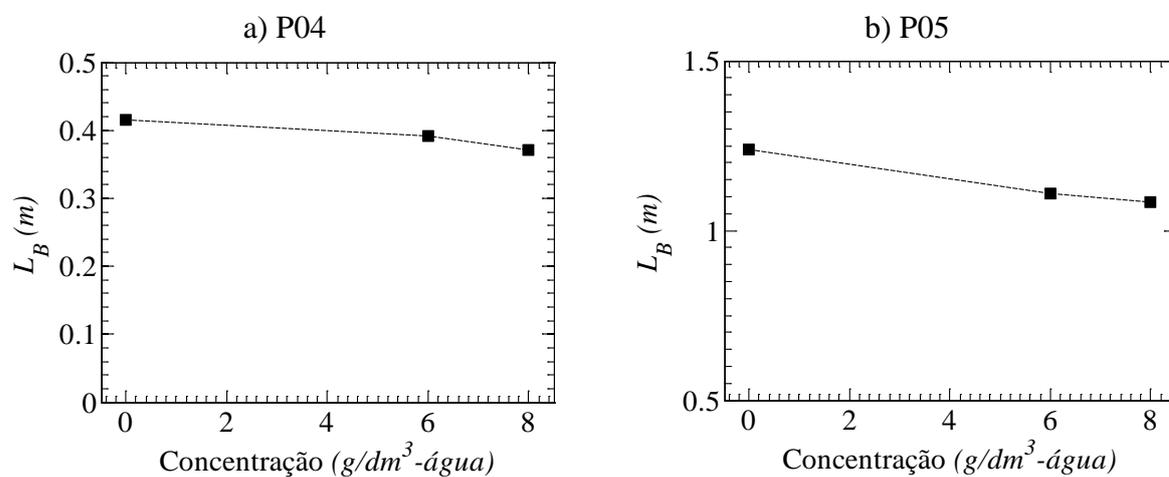
Na Figura 4.15, pode ser observado que o comprimento da bolha diminui com o aumento da concentração de partículas. O comprimento da bolha alongada está relacionado diretamente com a vazão de gás em relação à vazão de mistura (ROSA e ALTEMANI, 2006). Como o escoamento com partículas pode ser assemelhado a um escoamento bifásico dispersão-gás, devido ao fato de a fase contínua de líquido ser substituída por uma mistura de líquido-partículas, o aumento da quantidade de partículas (e por consequência da velocidade da mistura) para a mesma vazão de gás levará à redução da relação  $J_G/J$  e, conseqüentemente, à redução do comprimento da bolha.

A diminuição do comprimento da bolha alongada com o aumento da concentração é manifestada por um deslocamento da curva de densidade de probabilidade para o lado esquerdo do eixo de comprimentos.



**Figura 4.15 - Função Densidade de Probabilidade do comprimento da bolha na estação 2 para os pontos P04 e P05 nas concentrações de  $0 \text{ g/dm}^3$ -água,  $6 \text{ g/dm}^3$ -água,  $8 \text{ g/dm}^3$ -água.**

Os valores médios do comprimento da bolha alongada, apresentados na Figura 4.16, confirmam a tendência de diminuição com o aumento da concentração de partículas observado na Figura 4.15. Os valores médios para o comprimento da bolha nos pontos P04 e P05 são apresentados na Tabela 4.6.



**Figura 4.16 - Valores médios do comprimento da bolha na estação 2 para os pontos P04 e P05 nas três concentrações de partículas.**

**Tabela 4.6 - Valores médios do comprimento da bolha para as três concentrações de partículas na estação 2.**

<i>Ponto</i>	$J_G$ (m/s)	$J_L$ (m/s)	<i>Concentração</i> (g/dm <sup>3</sup> -água)	$L_B$ (m)
P04	0,75	0,75	0	0.4158
			6	0.3912
			8	0.3712
P05	1,00	0,50	0	1.2398
			6	1.1086
			8	1.0835

Procurando uma equação para descrever os valores experimentais do comprimento da bolha, na Figura 4.17 são apresentados os comprimentos adimensionais da bolha em função da relação de velocidades superficiais  $J_G/J$ . Seguindo a abordagem de Vicencio (2013), é proposto um ajuste exponencial para as medidas experimentais. A relação proposta possui a seguinte forma:

$$\frac{L_B}{D} = a \cdot \exp\left(b \cdot \frac{J_G}{J}\right) \quad (4.6)$$

Através de uma regressão linear dos valores experimentais, os coeficientes  $a$  e  $b$  da Eq. (4.6) são determinados. Os valores das constantes e dos coeficientes de correlação são apresentados na Tabela 4.7.

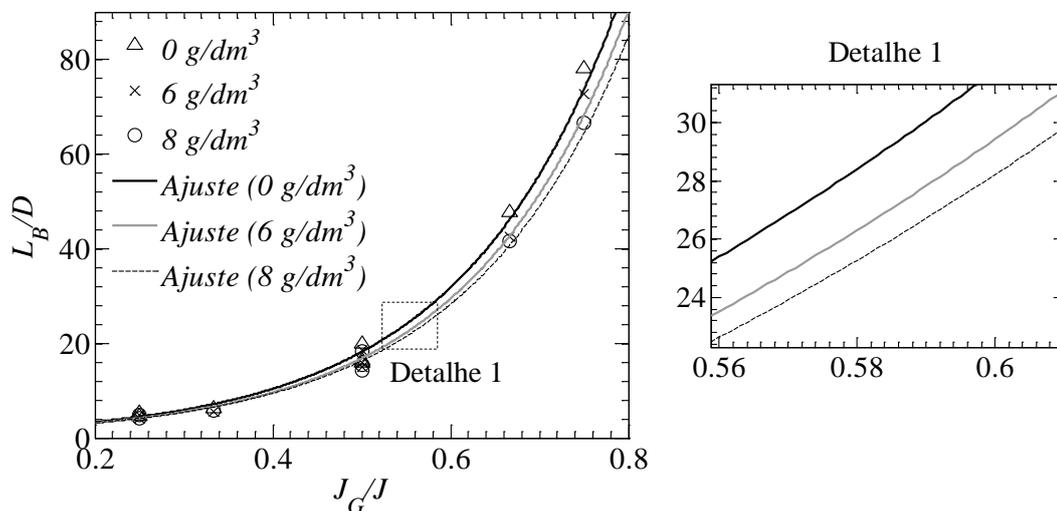
**Tabela 4.7 - Coeficientes do ajuste exponencial para o comprimento da bolha.**

<i>Concentração</i> (g/dm <sup>3</sup> -água)	$a$	$b$	$R^2$
0	0,9093	5,937	0,9975
6	0,8337	5,945	0,9974
8	0,9946	5,671	0,9971

Observa-se na Tabela 4.7 que os coeficientes de correlação  $R^2$  estão próximos da unidade, indicando que a curva de ajuste representa bem os dados experimentais medidos.

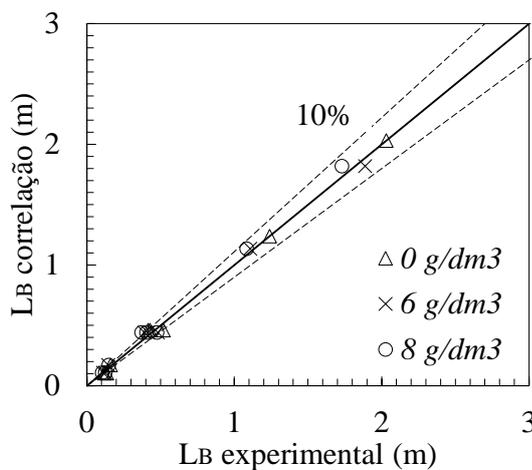
Visando obter o comportamento do ajuste com a inserção de partículas, é apresentado um comparativo entre os ajustes para as três concentrações na Figura 4.17. Nota-se no Detalhe 1 que o comprimento da bolha previsto diminui com o incremento da concentração, confirmando a tendência observada nas distribuições de probabilidades (Figura 4.15) e nos valores médios (Figura 4.16). Uma análise da curva de ajuste indica uma relação direta entre a

quantidade de gás na mistura e o comprimento da bolha alongada, mostrando que um aumento na relação  $J_G/J$  leva a um aumento do comprimento da bolha.



**Figura 4.17 - Comparação dos ajustes para o comprimento da bolha para diferentes concentrações de partículas.**

Utilizando a Eq. (4.6) pode-se obter os valores de correlação para o comprimento da bolha. A Figura 4.18 apresenta a comparação de valores de comprimento da bolha obtida a partir da correlação em relação aos valores experimentais. Observa-se um erro máximo de  $\pm 10\%$ .

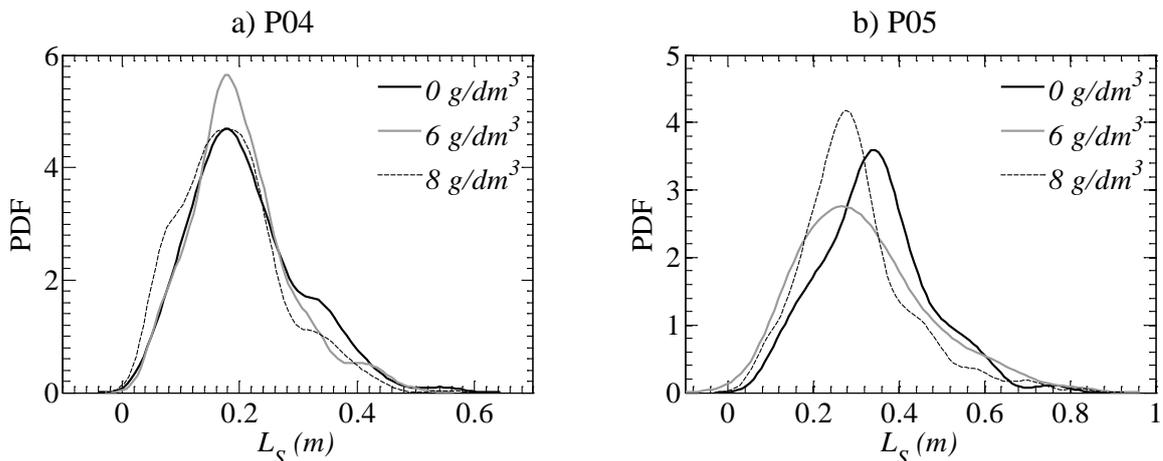


**Figura 4.18 - Comparação de valores de comprimento da bolha de correlação e experimentais para as três concentrações.**

#### 4.4.4 Comprimento do pistão

O último parâmetro analisado neste trabalho é o comprimento do pistão. Um gráfico das Funções Densidade de Probabilidade para os pontos P04 e P05 na estação 2 é apresentado na Figura 4.19. Analisando o caso particular do ponto P04 para a concentração de  $0 \text{ g/dm}^3$ -água, encontram-se valores de comprimento do pistão sem uma tendência bem definida. Apresentando maior concentração de pistões pequenos em comparação a pistões grandes. Isto é manifestando com uma PDF deslocada para o lado esquerdo. Essa tendência é observada também para as demais concentrações. Autores como Brill et al. (1981), Vicencio (2013) e Rodrigues (2015) sugerem caracterizar este comportamento através de uma distribuição Log-normal.

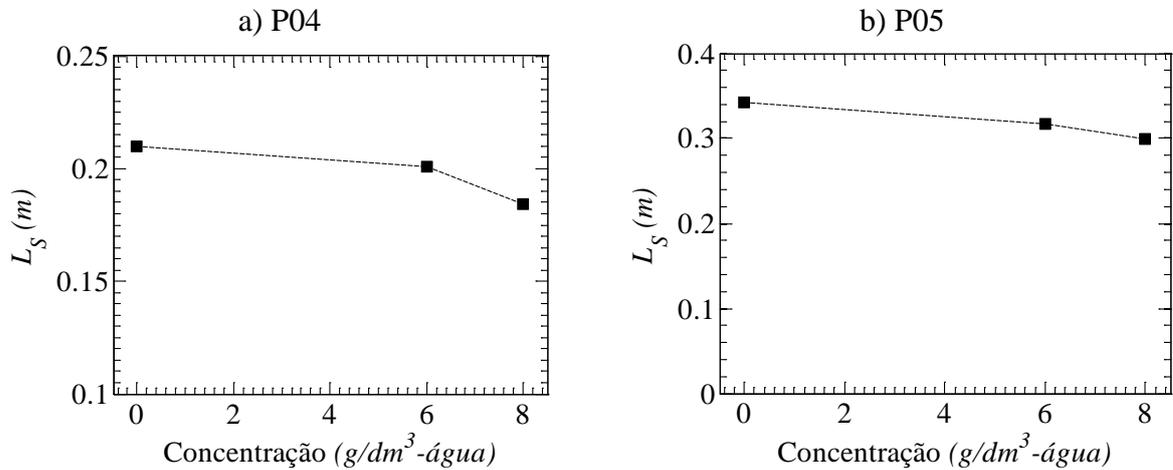
Uma análise da influência das partículas no comprimento do pistão mostra, na maioria dos pontos, uma diminuição do comprimento de pistão com o incremento da concentração de partículas. Esse comportamento deve-se possivelmente ao aumento da velocidade da frente da bolha com o acréscimo da quantidade de partículas, o que faz com que a distância entre as bolhas diminua levando ao aparecimento de pistões menores. A diminuição do comprimento do pistão é evidenciada na Figura 4.19 com um deslocamento das distribuições PDF para o lado esquerdo do eixo de  $L_S$ .



**Figura 4.19 - Função Densidade de Probabilidade do comprimento do pistão na estação 2 para os pontos P04 e P05 nas concentrações de  $0 \text{ g/dm}^3$ -água,  $6 \text{ g/dm}^3$ -água,  $8 \text{ g/dm}^3$ -água**

A Figura 4.20 confirma a tendência observada nas PDFs da Figura 4.19, com os valores médios do comprimento do pistão mostrando uma leve diminuição com o aumento da

concentração de partículas. Os valores médios de  $L_S$  dos pontos observados na Figura 4.20 são mostrados na Tabela 4.8.



**Figura 4.20 - Valores médios do comprimento do pistão na estação 2 para os pontos P04 e P05 nas três concentrações de partículas.**

**Tabela 4.8 - Valores médios do comprimento do pistão para as três concentrações de partículas na estação 2.**

Ponto	$J_G$ (m/s)	$J_L$ (m/s)	Concentração (g/dm³-água)	$L_S$ (m)
P04	0,75	0,75	0	0,2099
			6	0,2008
			8	0,1845
P05	1,00	0,50	0	0,3430
			6	0,3172
			8	0,2990

A fim de caracterizar o comportamento do comprimento do pistão é proposto um ajuste exponencial de dois termos. As variáveis independentes e dependentes são apresentadas de forma adimensional seguindo a abordagem do Vicencio (2013). Assim o comprimento do pistão adimensional é expresso em função do número de Reynolds e do número de Strouhal, na forma:

$$\frac{L_S}{D} = a \cdot \exp(b \cdot Re_j St) + c \cdot \exp(d \cdot Re_j St) \quad (4.7)$$

Através da regressão dos dados experimentais, encontram-se os coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , e  $d$  da Eq. (4.5) apresentados na Tabela 4.9.

**Tabela 4.9 - Coeficientes do ajuste exponencial para o comprimento do pistão.**

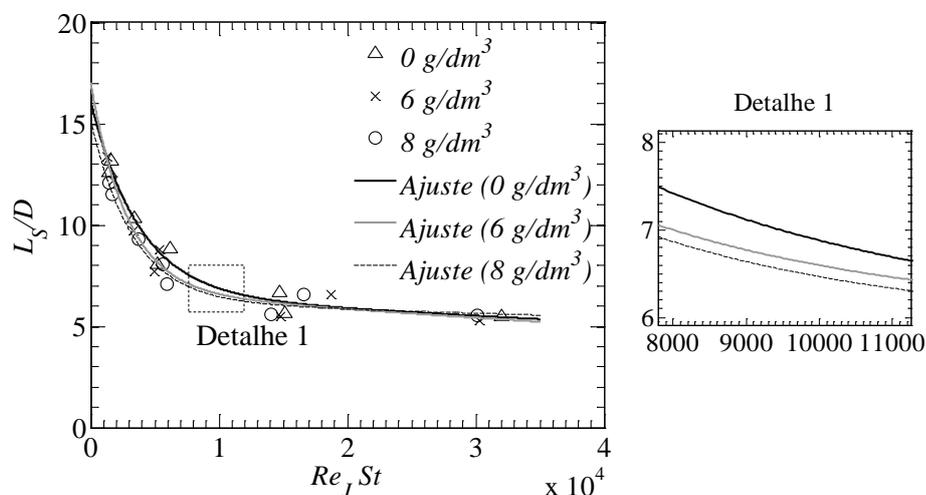
Concentração (g/dm <sup>3</sup> -água)	a	b	c	d	R <sup>2</sup>
0	9,502	-0,0002684	6,662	-0,00000606	0,9716
6	10,25	-0,0003525	6,780	-0,000007414	0,9706
8	8,937	-0,0003039	6,244	-0,000003339	0,9777

Como pode ser visto na Tabela 4.9, os ajustes apresentados possuem um coeficiente de correlação em torno de 0,97, o que indica um bom ajuste dos dados experimentais.

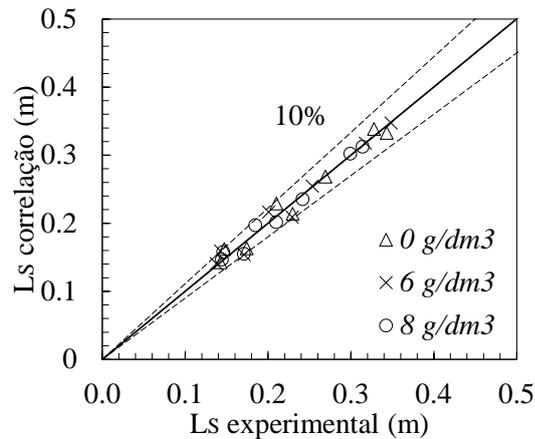
Na Figura 4.21 é mostrado um comparativo dos ajustes do comprimento da bolha em relação ao produto entre o número de Reynolds e o número de Strouhal para as três concentrações de partículas. O produto de  $Re_J$  e  $St$  pode ser entendido como a razão entre a inércia do movimento transiente e as forças viscosas, sendo que, quando as forças viscosas são maiores, o líquido tem a capacidade de formar pistões maiores, e, pelo contrário, quando as forças viscosas são superadas e as forças inerciais transientes são maiores, o líquido tende a formar pistões de menor tamanho (VICENCIO, 2013).

A partir do Detalhe 1 da Figura 4.21, nota-se que o comprimento do pistão em função do produto entre o número de Reynolds e o número de Strouhal, para as mesmas condições de velocidade superficial, diminui com o incremento da concentração de partículas.

A Figura 4.22 apresenta uma comparação entre os valores de comprimento do pistão estimados pela correlação da Eq. (4.7) em relação aos valores experimentais. Os valores apresentaram um desvio de  $\pm 10\%$ .



**Figura 4.21 – Comparação dos ajustes do comprimento do pistão para diferentes concentrações de partículas.**



**Figura 4.22 - Comparação de valores de comprimento de pistão calculada pela correlação e os dados experimentais para as três concentrações de partículas.**

#### 4.5 Evolução dos parâmetros das golfadas ao longo da tubulação

Visando analisar a evolução dos parâmetros característicos das golfadas ao longo da tubulação horizontal, a seguir são apresentadas as funções densidade de probabilidade e os valores médios obtidos para o escoamento nos pontos P04 e P05 em todas as estações de medição, as quais estão localizadas a 5,2 m (200D), 6,5 m (250D) e 7,8 m (300D) da entrada da mistura, como mostrado na Figura 3.7.

Para facilitar a compreensão do comportamento dos parâmetros ao longo da tubulação, é importante entender que a variação dos valores do comprimento do pistão e da bolha está ligada a dois efeitos: (i) a expansão do gás devido à queda de pressão ao longo da tubulação e (ii) a interação entre as bolhas (coalescência) devido à intermitência do escoamento (RODRIGUES, 2009). O efeito de expansão afeta diretamente no volume do gás, que aumenta de forma gradual, levando ao aumento do comprimento da bolha. Esse aumento no comprimento da bolha faz com que o filme abaixo dela também aumente, deslocando dessa forma uma quantidade de líquido anteriormente no pistão para preencher essa região, fazendo com que o comprimento do pistão diminua. O efeito da interação entre as bolhas também leva ao acréscimo em seus comprimentos devido às coalescências, que geram bolhas maiores e fazem com que o líquido do pistão entre as bolhas que coalesceram seja redistribuído no filme e nos demais pistões.

Na Figura 4.23 e Figura 4.24 são apresentadas as funções densidade de probabilidade da velocidade da frente da bolha, frequência e comprimentos da bolha e pistão nas três estações

de medição, para cada concentração de partícula utilizada. Nos pontos analisados, devido ao duto de acrílico utilizado e à baixa variação da viscosidade da mistura água-partículas, a queda de pressão não foi muito significativa, o que diminui os efeitos de expansão do mecanismo (i). Porém, a mudança nas propriedades devido à introdução do material particulado influencia na interação entre as bolhas e muda a taxa de coalescências, afetando o mecanismo (ii).

Como pode ser visto na Figura 4.23 e Figura 4.24, para o caso de escoamento bifásico os comprimentos das bolhas e pistões aumentam ao longo das três estações, indicando a presença de coalescências. O incremento dos comprimentos é manifestado pelo deslocamento das distribuições de probabilidade para o lado direito do eixo dos comprimentos. Nas concentrações de  $6 \text{ g/dm}^3$  e  $8 \text{ g/dm}^3$ , a taxa de coalescências é menor, conforme já discutido na seção 4.3. Isso leva a um menor crescimento dos comprimentos da bolha e do pistão, confirmando a indicação que a presença de partículas retarda a coalescência.

Observa-se nas Figuras Figura 4.23 e Figura 4.24 que as velocidades da frente da bolha diminuem ao longo do escoamento, o que é causado pela coalescência das bolhas, onde uma bolha mais rápida alcança uma mais lenta, resultando em uma bolha maior com velocidade próxima à da mais lenta. Como a frequência de passagem da célula unitária está diretamente relacionada com a velocidade da frente da bolha, é possível observar na frequência a mesma tendência de diminuição apresentada na velocidade da bolha.

Na Figura 4.25 são apresentados gráficos com os valores médios para os parâmetros característicos no ponto P04, onde se pode confirmar a tendência observada na Figura 4.23 de incremento nos valores dos comprimentos do pistão e da bolha ao longo do escoamento. Além disso, percebe-se uma diminuição dos valores médios da frequência de passagem da bolha ao longo das três estações, que está em concordância com a diminuição da velocidade da frente da bolha observada.

As variações dos parâmetros ao longo do escoamento para o ponto P05 são menos acentuadas que do ponto P04, porém é possível observar um leve aumento dos comprimentos da bolha e pistão, que pode ser confirmado com os valores médios mostrados na Figura 4.26 (para o ponto P05). Isto ocorre possivelmente devido ao fato do comprimento médio do pistão no ponto P05 ser maior que do ponto P04, ficando em torno de  $15D$ . Isso faz com a intensidade de coalescências seja menor (RODRIGUES, 2009). Nota-se ainda uma diminuição da velocidade da frente da bolha, que leva a uma diminuição da frequência, como pode ser confirmado com os valores médios mostrados na Figura 4.26.

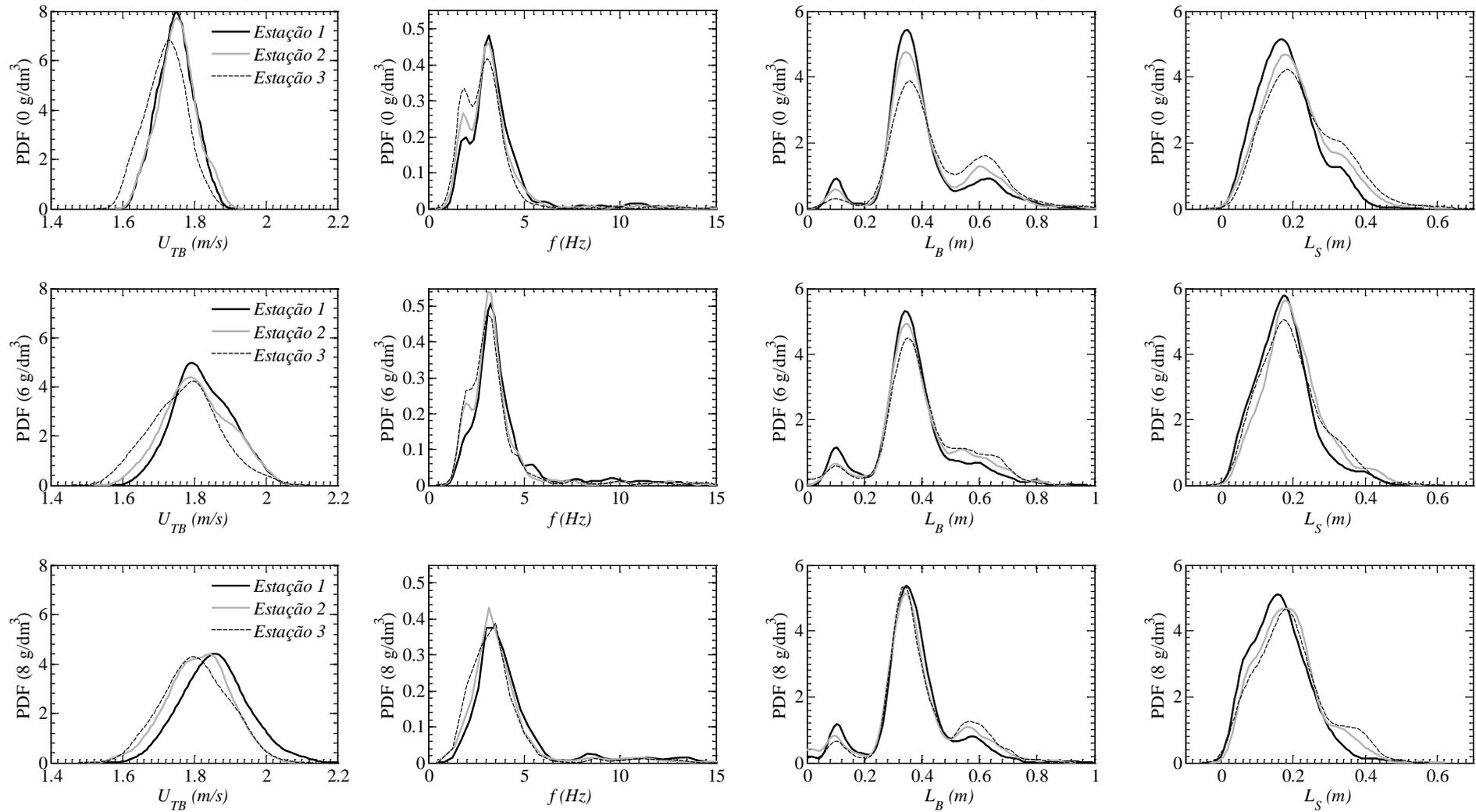


Figura 4.23 - Parâmetros característicos das golfadas para o ponto P04 ao longo da tubulação nas três concentrações de partículas.

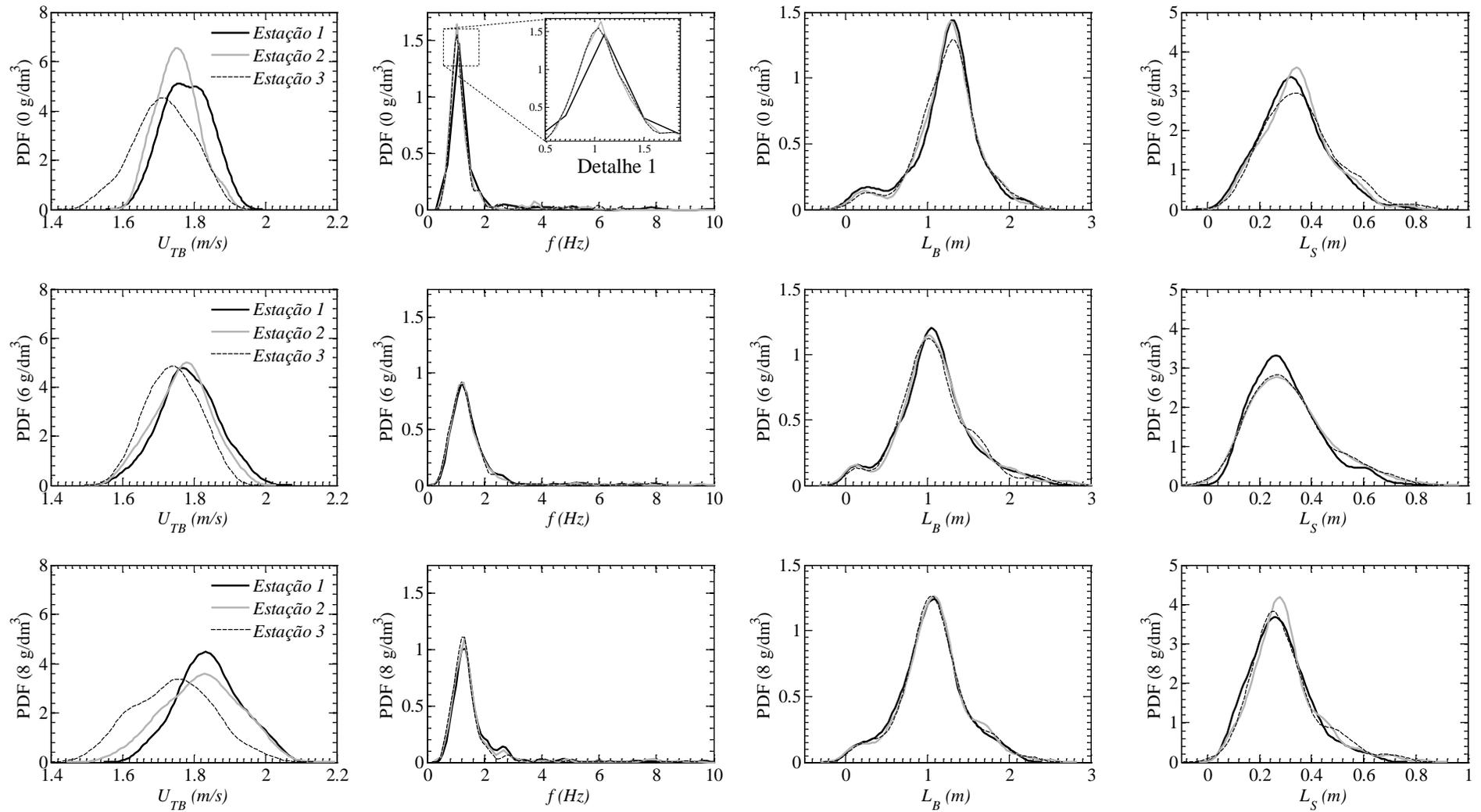


Figura 4.24 - Parâmetros característicos das golfadas para o ponto P05 ao longo da tubulação nas três concentrações de partículas.

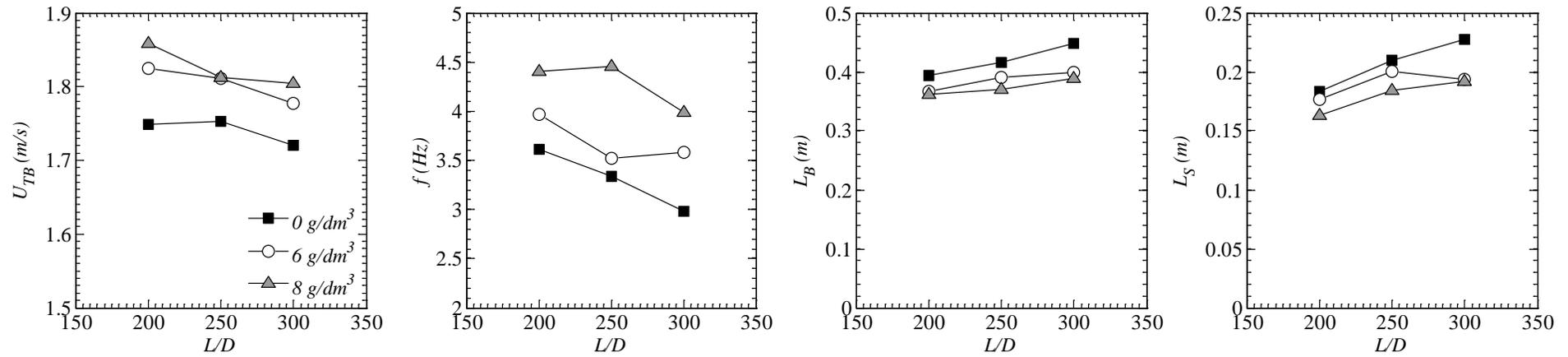


Figura 4.25 - Valores médios dos parâmetros das golfadas ao longo da tubulação para o ponto P04 nas três concentrações de partículas.

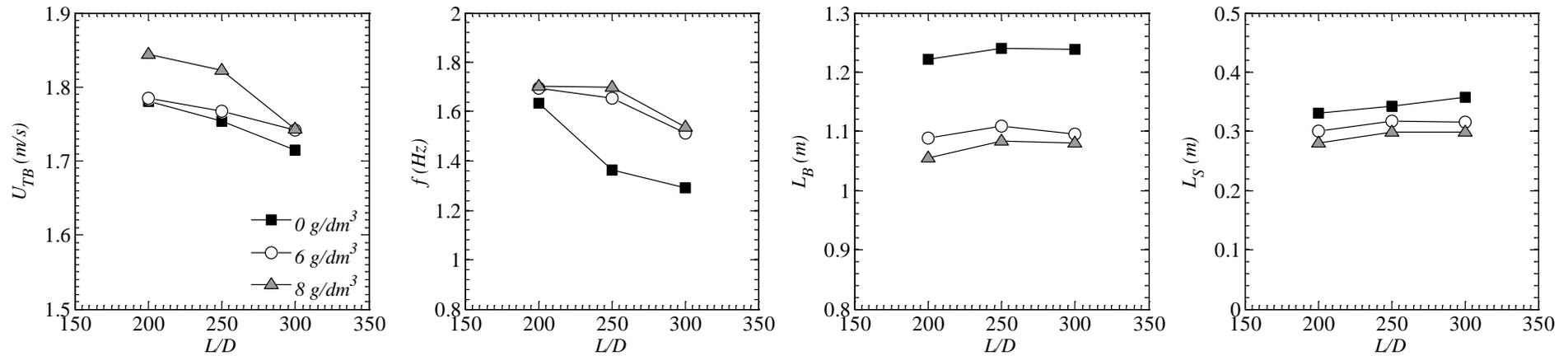


Figura 4.26 - Valores médios dos parâmetros das golfadas ao longo da tubulação para o ponto P05 nas três concentrações de partículas.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise experimental do escoamento líquido-gás em golfadas para tubulações horizontais com 26 mm de diâmetro interno. O objetivo principal foi analisar a influência das partículas (similares ao hidrato) nos principais parâmetros do escoamento em golfadas. Os parâmetros característicos foram medidos por sensores do tipo resistivo colocados em três seções da tubulação. Adicionalmente, foi utilizada uma câmera de alta velocidade para visualizar o escoamento na segunda estação de medição. Foram testados 8 pares de velocidades superficiais de líquido e gás para três concentrações de partículas, sendo uma delas o escoamento bifásico líquido-gás.

A introdução das partículas causou um maior descolamento da frente da bolha alongada em relação à parede superior da tubulação, assim como uma maior concentração de bolhas dispersas no filme. Outra constatação importante foi a presença de uma região de esteira intensificada na traseira da bolha pela introdução de partículas, com maior desprendimento de bolhas.

Maiores concentrações de partículas resultaram em maiores velocidades de translação da bolha alongada, com um conseqüente aumento da frequência de passagem das golfadas. Os comprimentos das estruturas – isto é, bolha alongada e pistão – possuem uma tendência decrescente com o aumento da concentração das partículas. Correlações para estes parâmetros – frequência, velocidade de translação da bolha alongada e comprimento das estruturas – foram regredidas a partir dos dados experimentais e mostraram bom comportamento, com coeficientes de determinação acima de 0,97.

A evolução dos parâmetros do escoamento em golfadas ao longo da tubulação também foi analisada. A bolha alongada aumenta ao longo da tubulação devido a dois fenômenos: (i) a expansão do gás devido à queda de pressão e (ii) a coalescência das bolhas alongadas devido ao caráter intermitente do escoamento em golfadas. Percebeu-se que a introdução de partículas retarda o coalescimento das bolhas. O mesmo fato pode ser analisado pelas imagens da câmera de alta velocidade, que mostram uma maior dificuldade de as bolhas dispersas serem reintroduzidas na frente da bolha alongada, indicando uma variação da tensão superficial ou interação capilar entre a partícula e a interface gás-líquido.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Alguns pontos que não foram abordados no desenvolvimento do presente estudo experimental são sugeridos para trabalhos futuros:

1. Estender o banco de dados experimentais para uma faixa maior de combinações de velocidades superficiais de líquido e gás. Sugere-se a utilização de uma técnica de medição de fração de fase não intrusiva, visto o problema de deposição de partículas nos fios do sensor resistivo.
2. Desenvolver trabalhos experimentais considerando concentração de partículas mais elevadas.
3. Analisar a influência do tamanho das partículas nos parâmetros característicos das golfadas.
4. Estender o banco de dados experimentais para avaliar a influência da viscosidade da fase líquida e do diâmetro da tubulação.
5. Fazer um estudo experimental para escoamentos com leve inclinação.

## 6 REFERÊNCIAS

- ADDALI, ABDULMAJID. Monitoring Gas Void Fraction In Two-Phase Flow With Acoustic Emission, 2010.
- ALVES, Rafael Fabricio. Estudo experimental do escoamento bifásico líquido gás em golfadas com leve mudança de direção. 2015. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.
- BARNEA, D.; SHOHAM, O.; TAITEL, Y. Flow pattern transition for downward inclined two-phase flow; horizontal to vertical. *Chemical Engineering Science*, v. 37, n. 5, p. 735–740, 1982.
- BARNEA, D. A unified model for predicting flow-pattern transitions for the whole range of pipe inclinations. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 13, n. 1, p. 1–12, 1987.
- 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.
- 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*, Vol. 34, No. 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.
- DAVIES, J.T. Calculation of critical velocities to maintain solids in suspension in horizontal pipes. Vol.42(7), pp.1667-1670, *Chemical Engineering Science*. 1987.
- DORON, P., GRANICA, D. & BARNEA, D. Slurry flow in a horizontal pipes-experimental and modeling. *International Journal Multiphase Flow*, 13, 535-547. 1987.
- DORON, P. & BARNEA, D. A three-layer model for solid-liquid flow in horizontal pipes. *International Journal Multiphase Flow*, 19, 1029-1043. 1993.

- DORON, P. & BARNEA, D. Flow pattern maps for solid-liquid flow in pipes. *International Journal Multiphase Flow*, 22(2), pp. 273-83. 1995.
- DUKLER, A. E., & HUBBARD, M. G. A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 14(4), 337-347. 1975.
- DUKLER, A.E.; MARON, D.M.; BRAUNER, N. A physical model for predicting the minimum stable slug length. *Chemical Engineering Science*, v. 40, n. 8, p. 1379-1385, 1985.
- FAGUNDES, J.R. NETTO, J. FABRE, L.M. PERESSON. Shape of long bubbles in horizontal slug flow. *International Journal Multiphase Flow*, 25 (6), pp. 1129–1160. 1999.
- FABRE J. Advancements of Two-Phase Slug Flow Modeling. paper SPE 27961 presented at the 1994 U. of Tulsa Centennial Petroleum Engineering Symposium, Tulsa, 29-31 August.
- FABRE, J. Gas-liquid slug flow. [S.l.]: Springer, 2003.
- FERNANDES, R.C.; SEMIAT, R.; DUKLER, A.E. Hydrodynamic model for gas-liquid slug flow in vertical tubes. *Aiche Journal*, v. 29, p. 981–989, 1983.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. Introduction to Fluid Mechanics. Wiley, 2006.
- FRANKLIN, E. “Modelagem numérica para seguimento dinâmico de bolhas em escoamento intermitente horizontal gás-líquido”, Universidade Estadual de Campinas, 231 pp. Dissertação de mestrado, 2004.
- GARCÍA, F.; GARCÍA, J.M.; GARCÍA, R.; JOSEPH, D.D. Friction factor improved correlations for laminar and turbulent gas-liquid flow in horizontal pipelines. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 33, p. 1320–1336, 2007.
- GREGORY, G.A.; SCOTT, D.S. Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal concurrent gas-liquid slug flow. *AICHE Journal*, v. 15, p. 933–935, 1969.
- GRESKOVICH, E.J.; SHRIER, A.L. Slug Frequency in Horizontal Gas-Liquid Slug Flow. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, v. 11, n. 2, p. 317–318, 1972.

- GOHARZADEH, A., RODGERS, P., TOUATI, C. Influence of Gas-Liquid Two-Phase Intermittent Flow on Hydraulic Sand Dune Migration in Horizontal Pipelines, *J. Fluids Eng.* 132(7), 071301 (Jun 29, 2010), 2009.
- GOHARZADEH, A., RODGERS, P. Experimental characterization of solid particle transport by slug flow using Particle Image Velocimetry. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, Vol.147 (1), p.012069 (13pp), 2009.
- KRIEGER, I.M.; DOUGHERTY, T.J. A mechanism for non-newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Transactions of the Society of Rheology*, v. 3, p. 137–152, 1959.
- KOH, C. A, SLOAN, E. D., SUM, A. K.; WU, D. T. Fundamentals and Applications of Gas Hydrates ; *Ann. Rev. Chem. Biomol. Eng.* 2, 237-57, 2011
- MACHADO, D., HILDEBRANDO, F.; LIPINSKI, L. Sistema Multicanal de Sensores Resistivos para Medição de Escoamentos Bifásicos. 2013. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- NICKLIN, D.J.; WILKES, M.A.; DAVIDSON, J.F. Two-Phase Flow in Vertical Tubes. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, v. 40, p. 61–68, 1962.
- NICHOLSON, M. K.; AZIZ, K.; GREGORY, G. A. Intermittent two-phase flow in horizontal pipes: Predictive models. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 56, No. 6, pp. 653-663, 1978.
- 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.
- OLADELE, O.B., KURT, M.R., CATALIN, T. Particle holdup profile in horizontal gas-liquid-solid multiphase flow pipeline, *Chemical Engineering and Technology*, 28(12), pp. 1546-1653. 2005.
- OFUCHI, CESAR YUTAKA. Técnicas Avançadas para Análise de Escoamento Bifásico Gás-Líquido em Golfadas. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2011.
- PANTON, R. L., *Incompressible Flow*. Fourth Edition. Wiley, 2013.
- PEREA M, C D. Simulação numérica do escoamento bifásico líquido-gás em golfadas com transferência de calor em dutos horizontais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

- PETALAS, N.; AZIZ, K. A mechanistic model for multiphase flow in pipes. Anais da Petroleum Society of Canada - Annual Technical Meeting, Calgary, Canadá, 1998.
- RODRIGUES, H. Simulação numérica do escoamento bifásico gás líquido no padrão de golfadas utilizando um modelo lagrangeano de seguimento de pistões. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. 2009.
- RODRIGUES, R.L.P. Caracterização experimental do escoamento bifásico de gás-líquido descendente em golfadas em tubulações levemente inclinadas. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2015.
- ROSA, E.S. Slug flow structure in horizontal slug flow, *Thermal Engineering*, 3(2), pp. 151-160. 2004.
- ROSA, E.S.; ALTEMANI, C.A. C. Análise de Escoamentos em Golfadas de Óleos Pesados e de Emulsões Óleo-Água. Relatório, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2006
- STEVENSON, P., THORPE, R.B., KENNEDY, J.E., MCDERMOTT, C. The transport of particles at low loading in near-horizontal pipes by intermittent flow, *Chemical Engineering Science*, 56, pp. 2149- 2159. 2001
- STEVENSON, P., THORPE, R.B. The Velocity of Isolated Particles Along a Pipe in Smooth Stratified Gas – Liquid Flow, *AIChE J.* 48, 963-969. 2002.
- STEVENSON, P. THORPE, R.B. Energy dissipation at the slug nose and the modeling of solids transport in intermittent flow, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 81(2), pp. 271-278. 2003
- SHOHAM, O. Flow Pattern Transition and Characterization in Gas-Liquid Two-Phase Flow in Inclined Pipes, PhD dissertation, TelAviv U., Israel, 1982.
- SHOHAM, O. Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes. 1a Edição, Society of Petroleum Engineers, Richardson, EUA, 2006.
- SLOAN, E.D.; KOH, C.A. Clathrate hydrates of natural gases. 3a Edição, Taylor & Francis Group, Boca Raton, EUA, 2008.
- TAITEL, Y.; DUKLER, A.E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *AIChE Journal*, v. 22, p. 47–55, 1976.

- TAITEL, Y.; BARNEA, D. A consistent approach for calculating pressure drop in inclined slug flow. *Chemical Engineering Science*, v. 45, p. 1199–1206, 1990a.
- TAITEL, Y.; BARNEA, D. Two-Phase Slug Flow. *Advances in Heat Transfer*, v. 20, p. 83–132, 1990b.
- TAITEL, Y.; BARNEA, D. Effect of gas compressibility on a slug tracking model. *Chemical Engineering Science*, v. 53, n. 11, p. 2089–2097, 1998.
- TURIAN, R. M. & YUAN, T. F. (1977), “Flow of slurries in pipelines”. *AIChE J.* 23, 232-243.
- TURIAN, R. M., HSU, F. L. & MA, T. W. (1987), “Estimation of the critical velocity in pipeline flow of slurries”. *Powder Technol.* 51, 35-47.
- TUKEY, J. W. *Exploratory data analysis*. Reading, Ma, Vol. 231, p. 32, 1977.
- 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 de Erros*. 2da ed. Editora Edgard Blucher, 1996.
- WALLIS, G.B. *One dimensional two-phase flow*. 1a Edição, McGraw-Hill, New York, EUA, 1969.
- 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.
- ZABARAS, G.J. Prediction of slug frequency for gas/liquid flows. *SPE Journal*, v. 5, n. 3, p. 252–258, 2000.

## **APÊNDICE A - VALORES MÉDIOS DOS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DA GOLFADA**

Neste apêndice são apresentados os resultados médios obtidos pelos sensores resistivos nos experimentos. Na Tabela A.1 são mostrados os valores, para cada ponto nas três estações de testes e em todas as concentrações avaliadas, dos seguintes parâmetros: velocidade da bolha alongada ( $U_{TB}$ ), frequência da célula unitária ( $f$ ), comprimento da bolha ( $L_B$ ) e comprimento do pistão ( $L_S$ ). Os valores S1, S2 e S3 fazem referência às três estações avaliadas.

Tabela A.1 - Valores médios dos parâmetros característicos da golfada analisadas para as três concentrações ao longo da tubulação.

Ponto	$J_G$ (m/s)	$J_L$ (m/s)	Concentração (g/dm <sup>3</sup> )	$L_B$ (m)			$L_S$ (m)			$U_{TB}$ (m/s)			$f$ (Hz)		
				$S1$	$S2$	$S3$	$S1$	$S2$	$S3$	$S1$	$S2$	$S3$	$S1$	$S2$	$S3$
P01	0,25	0,75	0	0,1602	0,1356	0,1540	0,1565	0,1741	0,1737	1,1445	1,1410	1,1406	4,7424	4,7910	4,1203
			6	0,1300	0,1253	0,1387	0,1569	0,1711	0,1462	1,2284	1,2143	1,1410	6,4520	6,6297	6,6929
			8	0,1596	0,1251	0,1323	0,1493	0,1707	0,1702	1,1914	1,1964	1,1518	4,9195	6,5449	4,9968
P02	0,5	0,5	0	0,4196	0,4286	0,4672	0,2415	0,2692	0,2856	1,1564	1,1575	1,1486	2,3383	2,2048	2,0161
			6	0,4181	0,4143	0,4204	0,2305	0,2531	0,2281	1,2028	1,2009	1,1784	2,2371	2,3059	2,1679
			8	0,4150	0,4040	0,4016	0,2255	0,2415	0,2556	1,2106	1,2019	1,1751	2,7844	2,8262	2,3466
P03	0,5	1	0	0,1564	0,1618	0,1732	0,1366	0,1472	0,1642	1,7202	1,7202	1,7038	6,8790	6,5115	6,2027
			6	0,1402	0,1457	0,1482	0,1338	0,1426	0,1334	1,7568	1,7683	1,7436	7,6172	7,1414	7,9644
			8	0,1431	0,1480	0,1520	0,1325	0,1459	0,1391	1,7901	1,7960	1,7466	7,6119	7,1609	7,3409
P04	0,75	0,75	0	0,3933	0,4158	0,4477	0,1837	0,2099	0,2272	1,7485	1,7528	1,7209	3,6085	3,3335	2,9864
			6	0,3672	0,3912	0,3988	0,1767	0,2008	0,1934	1,8249	1,8108	1,7769	3,9687	3,5158	3,5798
			8	0,3617	0,3712	0,3896	0,1633	0,1845	0,1923	1,8582	1,8131	1,8045	4,4045	4,4530	3,9842
P05	1	0,5	0	1,2214	1,2398	1,2393	0,3308	0,3430	0,3581	1,7807	1,7536	1,7148	1,6362	1,3618	1,2928
			6	1,0881	1,1086	1,0948	0,3008	0,3172	0,3151	1,7854	1,7678	1,7415	1,6954	1,6550	1,5122
			8	1,0555	1,0835	1,0801	0,2805	0,2990	0,2995	1,8439	1,8219	1,7434	1,7048	1,7004	1,5367
P06	0,5	1,5	0	0,1152	0,1179	0,1236	0,1344	0,1425	0,1474	2,3262	2,3330	2,2986	10,5548	10,2361	9,9793
			6	0,1041	0,1098	0,1152	0,1330	0,1375	0,1397	2,3523	2,4035	2,3892	11,5711	11,1351	10,7839
			8	0,1011	0,1044	0,1087	0,1379	0,1443	0,1411	2,3742	2,3921	2,3577	11,4837	11,1679	11,1778
P07	1	1	0	0,4924	0,5195	0,5411	0,2158	0,2297	0,2487	2,3769	2,3711	2,3358	3,9631	3,9570	3,5249
			6	0,4608	0,4818	0,5072	0,2140	0,2291	0,2421	2,4049	2,3834	2,3898	4,2133	4,0326	3,6509
			8	0,4580	0,4760	0,4845	0,2076	0,2098	0,2252	2,4097	2,4240	2,3836	4,2509	4,2592	3,7307
P08	1,5	0,5	0	1,9356	2,0309	1,9482	0,3153	0,3278	0,3509	2,3595	2,3849	2,2413	1,3880	1,3994	1,3214
			6	1,8021	1,8873	1,8864	0,3042	0,3483	0,3486	2,3810	2,3932	2,3323	1,5402	1,4043	1,3529
			8	1,7287	1,7297	1,6710	0,2988	0,3138	0,3135	2,3896	2,3887	2,2530	1,6428	1,6616	1,3978

## APÊNDICE B – CÁLCULO DAS VELOCIDADES SUPERFICIAIS DO GÁS E DO LÍQUIDO.

Nesta seção serão apresentadas as relações utilizadas para medir as velocidades superficiais do líquido e do gás. Para calcular as velocidades superficiais das fases é necessário conhecer as vazões e a área da seção transversal da tubulação. A vazão do líquido foi medida através de um medidor tipo Coriolis, enquanto a vazão de gás foi fornecida por uma placa orifício previamente calibrada.

### B.1 VELOCIDADE SUPERFICIAL DO LÍQUIDO

A velocidade superficial do líquido ( $J_L$ ) na seção de teste é calculado como:

$$J_L = \frac{Q_L}{A} \quad (\text{B.1})$$

sendo  $Q_L$  e  $A$  a vazão volumétrica de líquido e a área da seção transversal do tubo, respectivamente.

Precisamos conhecer a vazão volumétrica de líquido que passa pelo medidor tipo Coriolis. Sabe-se que o medidor tipo Coriolis indica a vazão volumétrica da mistura ( $Q_{mis}$ ), que é formada pela vazão volumétrica de líquido ( $Q_L$ ) somada à vazão volumétrica de partículas ( $Q_{part}$ ), ou seja

$$Q_{mis} = Q_L + Q_{part} \quad (\text{B.2})$$

A concentração das partículas na dispersão de água ( $x$ ) é expressa por:

$$x = \frac{\dot{m}_{part}}{\dot{m}_L} = \frac{Q_{part} \rho_{part}}{Q_L \rho_L} \quad (\text{B.3})$$

Da Eq. (B.3) a vazão volumétrica das partículas é dada por:

$$Q_{part} = x Q_L \frac{\rho_L}{\rho_{part}} \quad (\text{B.4})$$

Substituindo a Eq. (B.4) na Eq. (B.2) e isolando  $Q_L$ , temos

$$Q_L = \frac{Q_{mis}}{\left(1 + x \frac{\rho_L}{\rho_{part}}\right)} \quad (\text{B.5})$$

Considerando uma dispersão homogênea das partículas no reservatório, a concentração das partículas no líquido também pode ser expressa como:

$$x = \frac{m_{part}}{m_L} = \frac{m_{part}}{\forall_L \rho_L} \quad (\text{B.6})$$

sendo  $m_{part}$  e  $\forall_L$  a massa de partículas em cada teste e o volume de líquido no reservatório, respetivamente.

Substituindo a Eq. (B.6) na Eq. (B.5) e rearranjando

$$Q_L = \frac{Q_{mis}}{\left(1 + \frac{m_{part}}{\rho_{part} \forall_L}\right)} \quad (\text{B.7})$$

Essa vazão volumétrica é então aplica na Eq. (B.1) para fornecer a velocidade superficial de líquido.

## B.2 VELOCIDADE SUPERFICIAL DO GÁS

Para calcular a velocidade superficial do gás e preciso conhecer a vazão volumétrica do gás. A vazão de gás na placa orifício foi medido utilizando rotâmetros da marca *Rheotest Haake*. A vazão em cada rotâmetro é calculada através de fichas de calibração que relacionam a posição do flutuador com a vazão volumétrica.

A vazão em cada rotâmetro é obtida através de fichas de calibração que relacionam a posição de seu flutuador com a vazão volumétrica. Porém, a vazão calculada a partir das fichas fornecidas pelo fabricante corresponde à vazão nas condições de pressão e temperatura com as quais os rotâmetros foram calibrados, portanto deve ser corrigida. Deste modo, a correção para vazão volumétrica no rotâmetro em condições diferentes a de calibração é da forma:

$$Q_{G-rot} = Q_{G-cal} \sqrt{\frac{P_{G-cal} T_{G-rot}}{P_{G-rot} T_{G-cal}}} \quad (\text{B.8})$$

onde  $Q_{G-rot}$  e  $Q_{G-cal}$  representam as vazões de gás nas condições reais e de calibração do rotâmetro.

A vazão volumétrica de gás na placa orifício é baseada na equação:

$$Q_{G-PO} = C_d \varepsilon \frac{A_{PO}}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{G-PO}}} \quad (\text{B.9})$$

sendo  $C_d$  o coeficiente de descarga do medidor,  $\varepsilon$  é o coeficiente de expansão do gás,  $A_{PO}$  é a área do orifício da placa,  $\beta$  é a relação entre o diâmetro da placa e do tubo à montante,  $\Delta P$  é o diferencial de pressão na placa orifício,  $\rho_{G-PO}$  é a massa específica do gás na placa orifício.

Foi montado um sistema em que uma mesma vazão mássica de gás passa pela placa de orifício e pelo rotâmetro, tem-se então:

$$Q_{G-PO} \rho_{G-PO} = Q_{G-rot} \rho_{G-rot} \quad (\text{B.10})$$

Desta forma a Eq. (B.9) pode ser escrita como:

$$Q_{G-rot} = C_d \varepsilon \frac{\rho_{G-PO}}{\rho_{G-rot}} \frac{A_{PO}}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{G-PO}}} \quad (\text{B.11})$$

Na Eq. (B.11), percebeu-se que o produto do coeficiente de descarga e de expansão pode ser expresso como uma função do número de Reynolds e da relação entre a queda de pressão na placa e a pressão de teste:

$$C_d \varepsilon = f \left( \text{Re}^{-0.5}, \frac{\Delta P}{P_{PO}} \right) \quad (\text{B.12})$$

Desse modo, o processo de calibração consiste em obter uma relação polinomial que ajuste os valores de  $\text{Re}^{-0.5}$  e  $\Delta P/P_{PO}$  para o produto  $C_d \varepsilon$ . Os diferentes dados são processados através do programa *Surfer 11* mediante uma análise de regressão.

A função polinomial é escolhida baseado em um erro máximo de 3%, e é substituída na Eq. (B.9) para finalmente calcular a vazão volumétrica de gás na placa orifício.

Devido à compressibilidade da fase gasosa, a vazão volumétrica em duas seções com pressões diferentes não é constante. Então, aplicando-se a conservação da massa de gás entre a placa orifício e a seção de testes tem-se:

$$Q_{G-PO} \rho_{G-PO} = Q_G \rho_G \quad (\text{B.13})$$

sendo que  $Q_G$  e  $\rho_G$  representam, respectivamente, a vazão volumétrica e a massa específica do gás na seção de testes.

Considerando um comportamento ideal e isotérmico do gás, a Eq. (B.13) pode ser escrita como:

$$Q_G = Q_{G-PO} \frac{P_G}{P_{G-PO}} \quad (\text{B.14})$$

onde  $P_G$  e  $P_{G-PO}$  representam a pressão na seção de testes e na placa orifício respectivamente.

Finalmente, a velocidade superficial do gás na seção de testes pode ser calculada pela seguinte função:

$$J_G = \frac{Q_{G-PO}}{A} \frac{P_G}{P_{G-PO}} \quad (\text{B.15})$$

## APÊNDICE C – ANÁLISE DAS INCERTEZAS EXPERIMENTAIS

Incertezas ou erros sempre estão presentes no desenvolvimento de trabalhos experimentais. A incerteza pode ser definida como um indicativo de quanto um valor pode diferir do valor verdadeiro do mensurado. Se uma grandeza é determinada a partir da medição, o resultado é sempre uma aproximação do valor real.

Os erros podem ser de dois tipos: fixo e aleatório. O erro fixo (sistemático), que pode ser devido à calibração do instrumento, é repetitivo e afeta todas as medidas de uma mesma forma, podendo ser eliminado por uma correta calibração. O erro aleatório está associado à precisão e é diferente para cada leitura, fazendo com que não possa ser eliminado.

Para o cálculo das incertezas de deste trabalho, vamos considerar que o equipamento utilizado foi corretamente calibrado de forma a eliminar os erros fixos. Desta forma, o objetivo da análise de incerteza será estimar o erro aleatório.

A seguir é apresentada uma análise de incertezas das medições experimentais, visando obter principalmente as incertezas das velocidades superficiais de líquido e do gás. A metodologia é baseada em Vuolo (1996) e Fox et al. (2010).

De forma geral, uma grandeza  $R$  pode ser expressa em função de outras grandezas como  $R=R(x_1, x_2, x_3)$ . O efeito sobre  $R$  da incerteza de grandeza  $x_i$  é dado por:

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

Enquanto a variação relativa de  $R$  é dada por:

$$\frac{\delta R_i}{R} = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i = \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} \frac{\delta x_i}{x_i} \quad (\text{C.2})$$

Utilizando-se a notação de incerteza relativa, temos:

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

Considerando o efeito combinado de todas as incertezas das grandezas  $x_i$  em  $R$ , a incerteza relativa de  $R$  pode ser expressa como:

$$u_R = \pm \left[ \left( \frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} u_1 \right)^2 + \left( \frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} u_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} u_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{C.4})$$

Para calcular a propagação das incertezas, precisamos definir as incertezas de cada um dos instrumentos de medição utilizados.

Muitas vezes, não tem sentido medir a mesma quantidade repetidas vezes a fim de avaliar flutuações estatísticas em virtude do tempo e custo excessivos. Uma situação mais típica do trabalho de engenharia é medir uma quantidade uma única vez. Uma estimativa razoável da incerteza aleatória de medição é utilizar a metade da menor escala do instrumento.

A seguir a precisão dos instrumentos utilizados neste experimento é apresentada na Tabela C.1.

**Tabela C.1 – Incertezas relativas dos instrumentos utilizados**

<i>Mensurando</i>	<i>Incertezas relativas</i>
Diâmetro do tubo ( $D$ )	$\pm 0,10\%$
Pressão na placa de orifício ( $P_{rot}$ )	$\pm 0,40\%$
Pressão na seção de testes ( $P_{st}$ )	$\pm 0,40\%$
Vazão volumétrica da mistura ( $Q_{mis}$ )	$\pm 0,10\%$
Vazão volumétrica de gás ( $Q_G$ )	$\pm 2,00\%$
Massa de partículas ( $m$ )	$\pm 0,03\%$
Volume ( $liq$ )	$\pm 0,50\%$

A incerteza do diâmetro interno da tubulação ( $D$ ) é calculada como a metade da menor escala de medição (para o paquímetro 0,05 mm). Para obter a incerteza relativa este valor foi dividido pelo diâmetro da tubulação.

As incertezas relativas da vazão volumétrica do líquido e das pressões são obtidas a partir dos certificados de calibração dos fabricantes.

A incerteza da vazão volumétrica de gás é calculada considerando o erro do instrumento usado para a calibração. O instrumento utilizado foi o rotâmetro, sua incerteza é calculada como a metade da menor escala que tem (1 SKT). A incerteza relativa é calculada a partir do mínimo SKT medido (25 SKT), assim a incerteza máxima foi de  $0,5/25=0,02$  ou 2,00%.

A incerteza do volume de líquido é calculada como a metade da menor escala de medição (10 ml). Assim, para obter a incerteza relativa, foi dividido esse valor pelo volume mínimo medido pela escala (1000 ml).

Para obter a incerteza relativa da massa de partículas, foi dividida a metade da escala mínima da balança utilizada (1 g) pelo peso mínimo da partícula considerada (1500 g).

Com os valores obtidos, a propagação das incertezas é calculada utilizando as seguintes equações:

$$J_G = \frac{P_{rot}}{P_{st}} \frac{\left( Q_{G-rot} \sqrt{\frac{P}{P_{tot} + P_{atm}}} \right)}{\left( \frac{\pi D^2}{4} \right)} \quad (C.5)$$

$$J_L = \frac{Q_{mis}}{\left( \frac{\pi D^2}{4} \right) \left( 1 + \frac{m}{\rho_{part} V_{liq}} \right)} \quad (C.6)$$

Finalmente as incertezas são mostradas na Tabela C.2.

**Tabela C.2 Incertezas relativas das variáveis experimentais**

<i>Variável</i>	<i>Incerteza Relativa</i>
$J_L$	±0,22%
$J_G$	±2,30%