

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

**HEDILBERTO ANTÔNIO ALBANO BARROS**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA MUDANÇA DE**  
**DIREÇÃO NA EVOLUÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-**  
**LÍQUIDO EM GOLFADAS**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**

**2019**

**HEDILBERTO ANTÔNIO ALBANO BARROS**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA MUDANÇA DE  
DIREÇÃO NA EVOLUÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-  
LÍQUIDO EM GOLFADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de concentração em Engenharia Térmica, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Rigoberto E. M. Morales  
Co-orientador: Prof. Dr. Moisés A. Marcelino Neto

**CURITIBA**

**2019**

#### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**

Barros, Hedilberto Antônio Albano

Estudo experimental da influência da mudança de direção na evolução do escoamento bifásico gás-líquido em golfadas [recurso eletrônico] / Hedilberto Antônio Albano Barros. -- 2019.

1 arquivo de eletrônico (170 f.) : PDF ; 6,75 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Área de Concentração: Engenharia Térmica. Linha de Pesquisa: Mecânica dos Fluidos, Curitiba, 2019.

Bibliografia: f. 134-140.

1. Engenharia mecânica - Dissertações. 2. Escoamento bifásico. 3. Escoamento em golfadas. 4. Tubulação - Dinâmica dos fluidos. 5. Medição. 6. Bolhas - Dinâmica. 7. Processamento de sinais. 8. Processamento de imagens. 9. Mecânica dos fluidos. 10. Modelos matemáticos. 11. Métodos de simulação. I. Melgarejo Morales, Rigoberto Eleazar, orient. II. Marcelino Neto, Moisés Alves, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 620.1

**Biblioteca Central do Câmpus Curitiba - UTFPR**  
**Bibliotecária: Luiza Aquemi Matsumoto CRB-9/794**



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

## **TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº366**

A Dissertação de Mestrado intitulada: **ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA MUDANÇA DE DIREÇÃO NA EVOLUÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-LÍQUIDO EM GOLFADAS**, defendida em sessão pública pelo Candidato **Hedilberto Antônio Albano Barros**, no dia 16 de dezembro de 2019, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração: Engenharia Térmica, Linha de Pesquisa: Mecânica dos Fluidos e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM.

### **BANCA EXAMINADORA:**

Prof.Dr.Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales- Presidente -UTFPR

Prof.Dr.Paulo Henrique Dias dos Santos - UTFPR

Prof.Dr.Igor Braga de Paula - PUC-RJ

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Ao meu avô, Chico Albano,  
que não pode ver este trabalho concluído.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter guiado meus passos até aqui e pela força em todos os momentos da vida.

À minha família, em especial aos meus pais, Jorge Barros e Carmem Lúcia, por sempre serem os maiores incentivadores dos meus desafios e por nunca medirem esforços para me acompanhar e apoiar em todas as minhas conquistas. A vocês, devo absolutamente tudo.

Ao meu irmão, Antônio Herbert pela companhia, pelo exemplo e pelos conselhos, ainda que à distância. À minha cunhada, Jennifer Florence que sempre me apoiou e que proporcionou a essa família ter o presente mais lindo que é minha sobrinha, Joey.

À minha avó, Rita Lopes, exemplo de mulher à frente do seu tempo, por todo o carinho e amor que recebi. Em memória aos meus avós Antônio Domingos, Maria Barros e a Francisco Albano que infelizmente não puderam ver o neto concluir este trabalho. Obrigado.

À minha melhor amiga, noiva, companheira de shows, musicais, pinturas, viagens e tudo mais que está por vir, obrigado por fazer parte da minha vida de todas as maneiras possíveis. Você é quem mais me motiva a seguir em frente na vida, Kílvia.

Aos amigos e colegas que obtive durante o mestrado, obrigado pelas conversas de corredor, pelas risadas na copa durante os cafés e almoços. Vocês trouxeram leveza aos dias de árduo trabalho. Em especial queria agradecer à galera da marmita, ao Pai de todos e à família nipônica.

Ao Núcleo de Escoamentos Multifásicos (NUEM), por sua excelente infraestrutura e organização e pela incrível equipe que o compõe, em especial aos técnicos Lima, Alex, Reinaldo, Bruno e Felipe, pois este trabalho não teria sido concluído sem as suas ajudas. Agradeço também ao aluno de iniciação científica, Fernando Czelusniak, que me auxiliou todos os dias durante os testes experimentais.

Aos pesquisadores do NUEM que foram ajudando-me a adquirir conhecimento para a realização deste trabalho ao longo do mestrado. Em especial queria agradecer: ao Me. Gabriel Toreli, por todo auxílio com a parte elétrica e de segurança da bancada experimental; ao Me. Rafael Alves, por toda ajuda com a metodologia experimental; à Dra. Cristiane Cozin, por todos os conselhos pessoais e profissionais que me guiaram até aqui; ao Dr. Eduardo Nunes, por todo o suporte com a instrumentação, tornando-se possível obter os resultados aqui apresentados; e por fim, ao Dr. Dalton Bertoldi, por todo auxílio burocrático de compras, pelos conselhos durante o mestrado, pelas conversas despreziosas e pela companhia no ataque do futebol.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Moisés Marcelino Neto, conterrâneo, que me ajudou desde que aqui cheguei. Sua experiência e sede por conhecimento me fizeram ter mais vontade a fazer um bom trabalho. Obrigado também pelas orientações acadêmicas, pois foram importantíssimas para o meu desenvolvimento.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rigoberto Morales, por toda a base de infraestrutura, conhecimento, responsabilidade e franqueza. Obrigado por toda confiança em mim depositada desde o primeiro encontro, a você tenho o meu mais profundo agradecimento.

## RESUMO

BARROS, Hedilberto Antônio Albano. Estudo experimental da influência da mudança de direção na evolução do escoamento bifásico gás-líquido em golfadas. 2019. 171. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

O escoamento bifásico gás-líquido no padrão golfadas possui como característica principal a intermitência das passagens das fases líquida e gasosa e é encontrado, por exemplo, em linhas de produção e transporte de petróleo e gás. O conhecimento do comportamento do escoamento em golfadas é necessário para o correto dimensionamento de tubulações ou equipamentos que operam na presença deste padrão. Nas operações de extração de petróleo em águas profundas, é comum observar situações em que a tubulação precisa se ajustar ao relevo do leito marinho, provocando assim mudanças na direção no escoamento. Nestes termos, no presente trabalho é desenvolvido um estudo experimental do escoamento bifásico gás-líquido no padrão golfadas em dutos com leve mudança de direção, constituídos de um trecho inicial horizontal seguido de um trecho inclinado. As medidas experimentais foram realizadas no circuito experimental do NUEM-UTFPR, que é composta por uma tubulação de 35,6m de comprimento e 0,026m de diâmetro interno. O circuito experimental conta com sensores resistivos para a detecção de fases instalados em quatro (4) estações de medição e uma câmera de alta taxa de aquisição de imagens que permitem monitorar os seguintes parâmetros característicos do escoamento em golfadas: velocidade da bolha alongada, comprimentos do pistão e da bolha alongada, frequência da célula unitária e fração de vazio. Três configurações de tubulação foram utilizadas, uma completamente horizontal, uma ascendente e outra descendente com ângulos de  $\pm 3^\circ$ ,  $\pm 5^\circ$  e  $\pm 7^\circ$  com relação à direção horizontal. As medidas foram realizadas para diferentes combinações de vazões de água e ar, à temperatura ambiente e pressão atmosférica na saída, que garantam o escoamento no padrão em golfadas na primeira estação de medição. Com a posse dos dados adquiridos experimentalmente, foram analisadas as influências das mudanças de direção, ascendente e descendente, no escoamento em golfadas. Nos casos ascendentes, observaram-se aumentos da velocidade da bolha alongada e do comprimento do pistão, bem como a diminuição do comprimento da bolha, principalmente para os pontos com vazões baixas de gás e de líquido ( $J=1-1,5\text{m/s}$ ), onde ocorre quebra da bolha na região do cotovelo. Em relação aos casos descendentes, foram observados o fenômeno de dissipação das golfadas que gera o escoamento estratificado, um padrão de transição entre o escoamento em golfadas e o estratificado, além do pistão de gás na região logo após o cotovelo. Foi observado que em regiões descendente a velocidade da bolha alongada e o comprimento do pistão tendem a diminuir e em contrapartida o comprimento da bolha tende a aumentar. Os efeitos observados quando há mudança de direção são provocados principalmente pelo empuxo que exerce força, ora a favor do escoamento, ora contrária, modificando os parâmetros do escoamento em golfadas.

**Palavras-chave:** escoamento bifásico, escoamento em golfadas, escoamento com mudança de direção.

## ABSTRACT

BARROS, Hedilberto Antônio Albano. Experimental study of direction change influence in the gas-liquid two-phase slug flow evolution. 2019. 171. Dissertation (Master Degree in Mechanical and Materials Engineering) – Federal Technological University-Parana. Curitiba, 2019.

The gas-liquid two-phase slug flow pattern has as a main characteristic the gas and liquid phases intermittence passages and is found in oil and gas production and transportation lines, for example. The slug flow behavior knowledge is necessary for the correct pipes or equipment design, which operates on this flow pattern presence. In deep-water oil extraction operations, it is common to observe situations where the piping needs to adjust to the seabed relief, thus causing flow direction changes. Thus, in the present work, an experimental study of the gas-liquid two-phase slug flow pattern in ducts with a slight direction change, consisting of horizontal initial sections followed by an inclined section is developed. The experimental measurements were performed in the NUEM-UTFPR experimental circuit, which is composed of a 35.6m long and 0.026m inner diameter pipe. The experimental circuit has resistive phase detection sensors installed in four (4) measuring stations and a high rate imaging camera that allows monitoring the following the slug flow characteristic parameters: the elongated bubble velocity, the piston, and elongated bubble lengths, the unit cell frequency and the void fraction. Three piping configurations were used, one completely horizontal, one upward and one downward with angles of  $\pm 3^\circ$ ,  $\pm 5^\circ$  and  $\pm 7^\circ$  concerning the horizontal direction. Measurements were made for different air and water flow combinations at ambient temperature and outlet atmospheric pressure to ensure the slug flow pattern in the first measurement station. With the experimentally acquired data possession, the upward and downward changes influences in the slug flow were analyzed. In the upward cases, we observe the increases in the elongated bubble velocity and piston length, as well as the decreases in bubble length, especially for points with low gas and liquid flow rates ( $J=1-1,5\text{m/s}$ ), where the bubble breaks in the elbow region. Regarding the descending cases, we observed the slug dissipation phenomenon that generates the stratified flow, a transition pattern between the slug and the stratified flows, and the gas piston in the region just after the elbow. It has been observed that in downward regions the elongated bubble velocity and piston length tend to decrease and in contrast, the bubble length tends to increase. The effects observed when there is a direction change are mainly caused by the buoyancy that exerts a force, sometimes in the same flow direction, or contrary, modifying the slug flow parameters.

**Keywords:** two-phase flow, slug flow, flow in hilly terrain.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de um sistema de produção submarino.....	17
Figura 2 - Padrões de escoamento em dutos horizontais.....	18
Figura 3 - Padrões de escoamento em dutos verticais.....	18
Figura 4 - Escoamento em Golfadas.....	19
Figura 5 - Configuração da tubulação com mudança de direção.....	21
Figura 6 - Transporte de petróleo em campos marinhos ( <i>off-shore</i> ).....	22
Figura 7 - Célula unitária.....	24
Figura 8 - Mapa de fluxo.....	27
Figura 9 - Volume de controle ao longo de um trecho da tubulação.....	28
Figura 10 - Comprimentos do pistão, da bolha e da célula unitária.....	29
Figura 11 - Formação das golfadas hidrodinâmicas.....	40
Figura 12 - (a) Cotovelo inferior e (b) cotovelo superior.....	41
Figura 13 - Processo de passagem de uma bolha por um cotovelo inferior.....	41
Figura 14 - Processo de passagem de uma golfada em um cotovelo superior.....	42
Figura 15 - <i>Wave flooding</i> .....	47
Figura 16 - Representação esquemática do circuito experimental.....	56
Figura 17 - Esboço do misturador de placas paralelas.....	57
Figura 18 - Esquema da distribuição das estações de medição.....	58
Figura 19 - Esquema da seção de filmagem.....	59
Figura 20 - Sensor resistivo.....	60
Figura 21 - Esboço do circuito eletrônico do sensor resistivo.....	61
Figura 22 - Seção transversal da tubulação.....	63
Figura 23 - Série temporal da fração de gás.....	64
Figura 24 - Série temporal binarizada.....	65
Figura 25 - Exemplo de diagrama de caixa.....	67
Figura 26 - <i>PDFs</i> dos valores de $R_G$ na estação 2 para as três baterias para os pontos (a) P8 e (b) P13.....	70
Figura 27 - Diagramas de caixa para $V_B$ na estação 2 das três baterias dos pontos P8(a) e P13(b). .....	71
Figura 28 - Pontos experimentais comparados com o mapa de fluxo de Taitel e Dukler (1976). .....	74
Figura 29 - Comparação dos valores médios $V_B$ experimental com a correlação de Bendiksen (1984) para todos os pontos e estações.....	75
Figura 30 - <i>PDFs</i> de $V_B$ para os pontos (a) P2, (b) P5, (c) P12 e (b) P17.....	76
Figura 31 - Comparação da frequência adimensional ( $Sr$ ) com as correlações de Gregory e Scott (1969) e Heywood e Richardson (1979) para todos os pontos e estações em função do $J_G/J$ . 77	
Figura 32 - <i>PDFs</i> de $f$ para os pontos (a) P2, (b) P6, (c) P1 e (b) P10.....	79
Figura 33 - Comparação de $L_B/D$ médio com a correlação de Vicencio et al. (2015) para todos os pontos e estações.....	80
Figura 34 - <i>PDFs</i> do $L_B$ para os pontos (a) P2, (b) P11, (c) P4 e (b) P6.....	81
Figura 35 - (a) $L_S/D$ em comparação com $Re_t Sr$ e (b) $L_S/D$ experimental em comparação com Vicencio et al. (2015) para todos os pontos e estações.....	83

Figura 36 – $PDFs$ do $L_S$ para os pontos (a) P2, (b) P4, (c) P1 e (b) P10.....	84
Figura 37 - (a) $R_{GB}$ em comparação com $J_G/J$ e (b) $R_{GB}$ experimental em comparação com Vicencio et al. (2015) para todos os pontos e estações. ....	85
Figura 38 - $PDFs$ do $RGB$ para os pontos (a) P2, (b) P4, (c) P5 e (b) P6.....	86
Figura 39 - $\beta$ em comparação com $J_G/J$ para todos os pontos e estações.....	87
Figura 40 – Exemplo do escoamento do ponto P15 ( $J_L=3m/s$ e $J_G=1m/s$ ).....	88
Figura 41 - Pontos experimentais no mapa de fluxo de Taitel e Dukler (1976) para escoamentos horizontal e inclinados ascendentes.....	89
Figura 42 - Comparação entre o $V_B$ e a correlação de Bendiksen (1984) para as inclinações $0^\circ$ , $+3^\circ$ , $+5^\circ$ e $+7^\circ$ .....	90
Figura 43 - Variação do $V_B$ entre as estações 4 e 2 para (a) os pontos P2, P5 e P11 e (b) P11, P13 e P14 em comparação com o ângulo de inclinação ( $\theta$ ).....	91
Figura 44 - Evolução de $V_B$ nas inclinações ascendentes para os pontos (a) P2 e (b) P3. Distribuições de $V_B$ das quatro estações do ponto P3 para as inclinações (c) $+3^\circ$ e (d) $+7^\circ$ ..	92
Figura 45 – Escoamento em um cotovelo $+7^\circ$ dos pontos (a) P2 e (b) P3.....	93
Figura 46 - Evolução do $Sr$ das inclinações ascendentes e horizontal para os pontos (a) P1, (b) P3, (c) P17 e (d) P18.....	95
Figura 47 - (a) Distribuições de $f$ das quatro estações na inclinação $+7^\circ$ do ponto P3 e (b) distribuições de $f$ das quatro inclinações na estação 4 do ponto P18.....	96
Figura 48 – Escoamento do ponto P7 para os casos (a) $0^\circ$ e (b) $+7^\circ$ .....	97
Figura 49 - Evolução do $L_B/D$ nas inclinações $0^\circ$ , $+3^\circ$ , $+5^\circ$ , $+7^\circ$ para os pontos (a) P3 e (b) P17; Distribuições de $L_B$ (c) do ponto P3 ao longo da tubulação na inclinação $+7^\circ$ e (d) do ponto P17 na estação S4 para as inclinações ascendentes e horizontal.....	98
Figura 50 - Evolução do $L_S/D$ nas inclinações $0^\circ$ , $+3^\circ$ , $+5^\circ$ , $+7^\circ$ para os pontos (a) P1 e (b) P8; Distribuições de $L_S$ (c) do ponto P1 na estação S4 para as inclinações ascendentes e horizontal e (d) do ponto P8 ao longo da tubulação na inclinação $+7^\circ$ .....	100
Figura 51 - Variação do $L_S/D$ entre as estações S2 e S1 para os pontos (a) P3, P5 e P10 e (b) P8, P10 e P11 em comparação com o ângulo de inclinação ( $\theta$ ).....	101
Figura 52 - $R_{GB}$ em função do ângulo de inclinação na última estação (S4) para os pontos P1, P2, P3, P8, P9 e P11.....	102
Figura 53 - Evolução do $R_{GB}$ nas inclinações $0^\circ$ , $+3^\circ$ , $+5^\circ$ , $+7^\circ$ para os pontos (a) P1 e (b) P17; Distribuições de $R_{GB}$ (c) do ponto P1 na inclinação $+7^\circ$ ao longo da tubulação e (d) do ponto P17 na estação 4 para as inclinações ascendentes e a horizontal.....	104
Figura 54 - Fator de intermitência na estação S4 em função da inclinação para os pontos (a) P1, P2 e P3 e (b) P8, P10 e P11.....	105
Figura 55 - Pontos experimentais no mapa de fluxo de Taitel e Dukler (1976) para escoamentos horizontal e inclinados descendentes ( $-3^\circ$ , $-5^\circ$ e $-7^\circ$ ).....	106
Figura 56 - Sinais de $R_{GB}$ do ponto P1 na inclinação $-3^\circ$ para os estações (a) S1, (b) S2 e (c) S3.....	108
Figura 57 - Evolução do $V_B$ nos casos $0^\circ$ , $-3^\circ$ , $-5^\circ$ e $-7^\circ$ para os pontos (a) P2, (b) P3, (c) P4 e (d) P7.....	110
Figura 58 - Distribuições de $V_B$ para (a) o ponto P2 na última estação para $0^\circ$ e $-7^\circ$ , (b) o ponto P3 e (c) o ponto P4 na inclinação $-7^\circ$ e (d) para o P7 na inclinação $-3^\circ$ ao longo da tubulação.....	111
Figura 59 - Efeito gravitacional provocado por um cotovelo superior no escoamento em golfadas.....	112

Figura 60- Evolução do $L_B/D$ nos casos $0^\circ$ , $-3^\circ$ , $-5^\circ$ e $-7^\circ$ para os pontos (a) P3, (b) P4, (c) P5 e (d) P7. ....	113
Figura 61 – Distribuições de $L_B$ (a) para o ponto P3 ao longo da tubulação na inclinação $-7^\circ$ e (b) para o ponto P4 na estação S4 para as inclinações $0^\circ$ , $-3^\circ$ , $-5^\circ$ e $-7^\circ$ . ....	114
Figura 62 - Evolução do $L_S/D$ nos casos $0^\circ$ , $-3^\circ$ , $-5^\circ$ e $-7^\circ$ para os pontos (a) P2 e (b) P7; Distribuições de $L_S$ para os pontos (c) P2 na inclinação $-5^\circ$ e (d) P7 na inclinação $-7^\circ$ . ....	115
Figura 63 - Evolução do $\beta$ nos casos $0^\circ$ , $-3^\circ$ , $-5^\circ$ e $-7^\circ$ para os pontos (a) P3, (b) P4, (c) P5 e (d) P7. ....	117
Figura 64 - Evolução do $V_B$ nos casos $0^\circ$ , $-3^\circ$ , $-5^\circ$ e $-7^\circ$ para os pontos (a) P8, (b) P17; Distribuições de $V_B$ (c) do ponto P8 ao longo da tubulação na inclinação $-7^\circ$ e (d) do ponto P17 da estação S3 para as inclinações $0^\circ$ , $-3^\circ$ , $-5^\circ$ e $-7^\circ$ . ....	118
Figura 65 - Evolução do $L_B/D$ nos casos $0^\circ$ , $-3^\circ$ , $-5^\circ$ e $-7^\circ$ para os pontos (a) P11 e (b) P16; Distribuições de $L_B$ (c) do ponto P11 e (d) do ponto P16 da estação S3 para as inclinações $0^\circ$ , $-3^\circ$ , $-5^\circ$ e $-7^\circ$ . ....	119
Figura 66 - Evolução do $R_{GB}$ nos casos $0^\circ$ , $-3^\circ$ , $-5^\circ$ e $-7^\circ$ para os pontos (a) P11 e (b) P16; Distribuições de $R_{GB}$ (c) do ponto P9 e (d) do ponto P16 da estação S3 para as inclinações $0^\circ$ , $-3^\circ$ , $-5^\circ$ e $-7^\circ$ . ....	121
Figura 67 - Evolução do $\beta$ nos casos $0^\circ$ , $-3^\circ$ , $-5^\circ$ e $-7^\circ$ para os pontos (a) P11 e (b) P18. ..	122
Figura 68 - Evolução de (a) $V_B$ , (b) $L_B/D$ , (c) $L_S/D$ e (d) $\beta$ para o ponto P1 para as inclinações $0^\circ$ , $-3^\circ$ , $-5^\circ$ e $-7^\circ$ . ....	124
Figura 69 - Distribuições do ponto P1 na inclinação $-7^\circ$ das variáveis (a) $V_B$ , (b) $L_B$ , (c) $L_S$ e (d) $f$ . ....	126
Figura 70 - Sinal de $R_{GB}$ das estações (a) S1 e (b) S2 para o ponto P3 no cenário $-7^\circ$ . ....	127
Figura 71 – Resumo dos comportamentos das variáveis estudadas no caso ascendente. ....	130
Figura 72 – Resumo dos comportamentos das variáveis estudadas no caso descendente. ....	131
Figura 73 - Interface para o controle do escoamento. ....	141
Figura 74 - Programa de aquisição dos sensores resistivos. ....	142

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os trabalhos com mudança de direção.....	55
Tabela 2 - Grade de testes experimental.....	74
Tabela 3 - Pontos em que ocorreram estratificação experimentalmente em comparação com o modelo de mapa de fluxo de Taitel e Dukler (1976).....	107
Tabela 4 - Incertezas padrões relativas dos instrumentos utilizados .....	145
Tabela 5 - Incertezas padrões relativas calculadas .....	146

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Romanas

	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
<i>A</i>	Área da seção transversal do tubo	$[m^2]$
<i>Bo</i>	Número de Bond	[-]
<i>Co</i>	Parâmetro de distribuição	[-]
<i>C<sub>∞</sub></i>	Parâmetro de deslizamento	[-]
<i>D</i>	Diâmetro	$[m]$
<i>d<sub>S</sub></i>	Distância entre os pares de sensores	$[m]$
<i>Eo</i>	Número de Eötvös	[-]
<i>f</i>	Frequência	$[Hz]$
<i>Fr</i>	Número de Froude	[-]
<i>g</i>	Aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
<i>h</i>	Constante de esteira	[-]
<i>h<sub>G</sub></i>	Altura de equilíbrio de gás	$[m]$
<i>h<sub>L</sub></i>	Altura de líquido	$[m]$
<i>H<sub>L</sub></i>	Fração de líquido	[-]
<i>J</i>	Velocidade da mistura	$[m/s]$
<i>J<sub>G</sub></i>	Velocidade superficial do gás	$[m/s]$
<i>J<sub>L</sub></i>	Velocidade superficial do líquido	$[m/s]$
<i>k</i>	Função ou variável aleatória	[-]
<i>l</i>	Dimensão linear	$[m]$
<i>L<sub>B</sub></i>	Comprimento da bolha	$[m]$
<i>L<sub>S</sub></i>	Comprimento do pistão	$[m]$
<i>L<sub>U</sub></i>	Comprimento da célula unitária	$[m]$
<i>M</i>	Média	[-]
<i>n</i>	Número do intervalo de classe	[-]
<i>n<sub>S</sub></i>	Número de golfadas	[-]
<i>p</i>	Função densidade de probabilidade	[-]
<i>P</i>	Pressão	$[kPa]$
<i>Pr</i>	Probabilidade	[-]
<i>Q</i>	Vazão volumétrica	$[m^3/s]$
<i>R<sub>G</sub></i>	Fração de gás	[-]
<i>Re</i>	Número de Reynolds	[-]
<i>Sr</i>	Número de Strouhal	[-]
<i>S</i>	Sensor ou estação de medição	
<i>t</i>	Tempo	$[s]$
<i>T</i>	Período	$[s]$
<i>u</i>	Função binária	

$V$	Tensão	[V]
$V_D$	Velocidade de deslizamento ( <i>drift velocity</i> )	[m/s]
$V_G$	Velocidade do gás	[m/s]
$V_B$	Velocidade de translação da bolha	[m/s]

### Letras Gregas

$\beta$	Fator de intermitência	[-]
$\rho$	Massa específica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\theta$	Ângulo de inclinação	[°]
$\sigma$	Tensão superficial	[N/m]
$\mu$	Viscosidade dinâmica	[Ns/m <sup>2</sup> ]
$\delta$	Parâmetro de forma	
$\phi$	Ângulo de contato com a interface	[rad]
$\omega$	Parâmetro de escala de distribuição	
$\Omega$	Desvio padrão	[-]

### Sub-índices

$J$	Mistura
$G$	Gás
$L$	Líquido
$B$	Bolha
$S$	Pistão
$i$	i-ésimo termo
$C$	Cheio
$V$	Vazio

### Siglas

FC	Fator de corte
K-H	Kelvin-Helmholtz
mca	Metro de coluna de água
NUEM	Núcleo de Escoamento Multifásico
PCI	Placa de circuito interno
PDF	<i>Probability Density Function</i>
TUFFP	<i>Tulsa University Fluid Flow Projects</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVO .....	20
1.2 JUSTIFICATIVA .....	21
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	24
2.1 ESCOAMENTO EM GOLFADAS .....	24
2.2 PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO ESCOAMENTO EM GOLFADAS .....	25
2.2.1 Velocidades Superficiais do Líquido e do G188ás.....	26
2.2.2 Comprimento da Bolha e do Pistão .....	28
2.2.3 Velocidade da Bolha.....	30
2.2.4 Frequência da Célula Unitária .....	33
2.2.5 Fator de Intermitência.....	37
2.2.6 Frações de Líquido e de Gás.....	38
2.3 ESCOAMENTO EM GOLFADAS COM MUDANÇA DE DIREÇÃO .....	40
2.3.1 Revisão de Trabalhos com Mudança de Direção .....	43
2.4 COMENTÁRIOS FINAIS .....	54
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	56
3.1 DESCRIÇÃO DO CIRCUITO EXPERIMENTAL .....	56
3.2 INSTRUMENTAÇÃO PARA DETECÇÃO DE FASES .....	59
3.2.1 Sensores Resistivos .....	59
3.2.2 Câmera de Alta Taxa de Aquisição de Imagens.....	61
3.3 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO .....	62
3.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS .....	63
3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	66
3.6.1 Diagrama de Caixa .....	66
3.6.2 Histogramas, <i>PDFs</i> e Distribuições .....	67
3.7 REPETITIVIDADE DAS MEDIÇÕES .....	70
3.8 SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	72
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
4.1 GRADE DE TESTES .....	73
4.2 ESCOAMENTO HORIZONTAL .....	74
4.2.1 Velocidade da Bolha Alongada .....	75
4.2.2 Frequência das Golfadas.....	77

4.2.3 Comprimento da Bolha.....	80
4.2.4 Comprimento do Pistão .....	82
4.2.5 Fração de Vazio na Bolha.....	85
4.2.6 Fator de Intermittência.....	87
4.3 ESCOAMENTO HORIZONTAL COM LEVE MUDANÇA NA DIREÇÃO ASCENDENTE .....	88
4.3.1 Velocidade da Bolha.....	89
4.3.2 Frequência das Golfadas.....	94
4.3.3 Comprimento da Bolha.....	96
4.3.4 Comprimento do Pistão .....	99
4.3.5 Fração de Vazio na Bolha.....	102
4.3.6 Fator de Intermittência.....	104
4.4 ESCOAMENTO HORIZONTAL COM LEVE MUDANÇA NA DIREÇÃO DESCENDENTE.....	105
4.4.1 Análise dos Pontos Experimentais que Ocorre Estratificação.....	107
4.4.2 Análise dos Pontos Experimentais que Não Ocorre Estratificação .....	117
4.4.3 escoamento com Bolha Invertida.....	122
4.4.4 Pistão de Gás .....	126
4.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	128
5 CONCLUSÃO.....	129
REFERÊNCIAS .....	134
APÊNDICE A – SISTEMA SUPERVISÓRIO.....	141
APÊNDICE B - INCERTEZAS .....	143
B.1 Propagação das Incertezas.....	143
B.2 Estimativa das Incertezas das Variáveis Experimentais .....	144
APÊNDICE C - VÍDEOS.....	147
APÊNDICE D - RESULTADOS MÉDIOS E DESVIOS PADRÕES .....	149
D.1 ASCENDENTE .....	150
D.2 DESCENDENTE.....	160

# 1 INTRODUÇÃO

O escoamento multifásico mistura duas ou mais fases, onde fase refere-se ao estado da matéria, podendo ser sólida, líquida ou gasosa (CROWE, 2005). Os escoamentos multifásicos ocorrem de forma natural em rios, vulcões, correntes atmosféricas e também nos escoamentos no corpo humano. Em processos industriais, podem ser encontrados em diversos equipamentos, como motores de combustão interna, geradores de vapor, em refrigeradores e no transporte de misturas em dutos. O estudo, portanto, do escoamento multifásico permeia diversas áreas, e torna-se mais presente na indústria química, nuclear, espacial e principalmente de petróleo (WALLIS, 1969). Este último é o campo no qual concentra-se o presente trabalho.

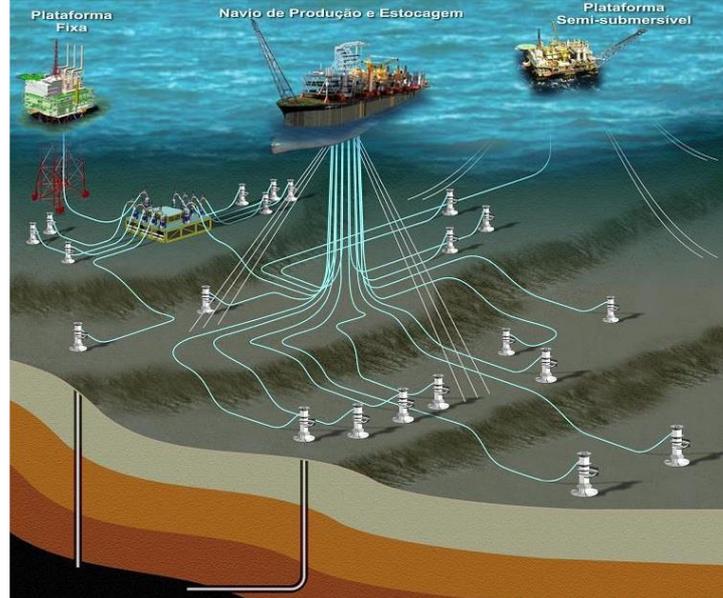
Na produção de petróleo, o escoamento é composto geralmente por água da formação, gás e partículas sólidas como areia e às vezes hidratos, além do próprio óleo. A água de formação possui grande concentração de sal, também chamada de água conata, que gera problemas na separação do óleo na superfície (RENPU, 2011). O gás pode ser de injeção (*gas-lift*), utilizado como método de elevação artificial, que tem como finalidade deixar o óleo mais leve e com isso facilitar a elevação. Pode haver gás associado proveniente do reservatório na forma de capa de gás que, porventura, pode escoar junto com o óleo e também o gás que é despreendido da fase líquida enquanto escoar devido as mudanças de pressão e temperatura. Por consequência, este tipo de escoamento é considerado multifásico, o qual traz diversos desafios em sua modelagem, nos estudos experimentais e nos processos industriais.

A Figura 1 mostra que o reservatório é conectado uma plataforma por tubulações preparadas nas etapas de completação e perfuração do poço, como a coluna de produção, linha de produção e *risers* que conduzem o escoamento. Faz-se necessário então, dimensionar corretamente este tipo de duto no sentido de diminuir os custos associados e para isso são requeridas as características do escoamento. A fim de simplificar o escoamento supracitado, usualmente, trata-se o escoamento de petróleo como sendo um escoamento bifásico, ou seja, composto por duas fases que são uma líquida e outra gasosa. Desta maneira, a fase líquida é composta pela combinação do óleo e da água e a fase gasosa pela junção do gás de injeção, do gás da formação e do gás oriundo do óleo por mudança de fase.

A mistura bifásica, escoando entre o poço e a plataforma, tende a modificar-se em função das características de vazão, das propriedades dos fluidos, do comprimento da tubulação, da geometria, da direção do escoamento, dos métodos de injeção e das forças de campo. Essas diferentes características do escoamento modificam as estruturas das tensões interfaciais influenciando o comportamento das distribuições geométricas das fases, segundo

Julia et al. (2013). As distribuições geométricas são denominadas de padrões de escoamento ou regimes de escoamento (SHOHAM, 2006).

**Figura 1 - Representação de um sistema de produção submarino**



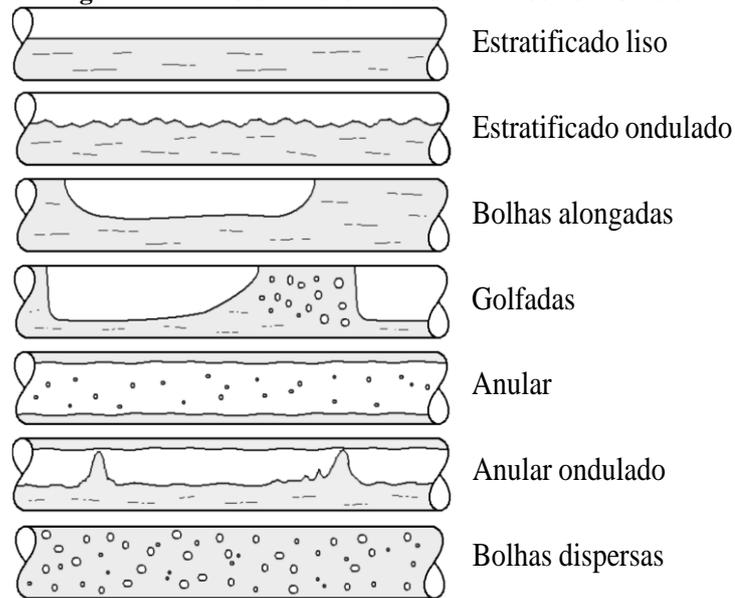
Fonte: Diário do Pré-Sal (2014).

Shoham (2006) classifica os padrões de escoamento na produção de petróleo, vistos na Figura 2, como bolhas dispersas, intermitente, anular e estratificado para escoamentos horizontais e inclinados. O escoamento estratificado pode ser dividido entre liso e ondulado, onde as fases se estratificam por separação gravitacional, sendo assim, a fase líquida escoar na parte inferior e a gasosa na superior da tubulação. O estratificado liso possui uma baixa vazão de líquido e baixa vazão de gás. Com o aumento da vazão de gás, provoca-se ondulações na região da interface gerando-se o estratificado ondulado.

Acrescendo-se a vazão de líquido, o escoamento torna-se instável caracterizando o escoamento intermitente, com alternância de um pistão de líquido e uma bolha de gás. O escoamento intermitente então ocorre com vazões moderadas de líquido, que para baixas vazões de gás denomina-se bolhas alongadas e golfadas para moderadas vazões de gás. No escoamento em golfadas, a turbulência na região traseira da bolha adiciona bolhas dispersas no pistão.

Ao incrementar-se a vazão de líquido, o escoamento rompe as bolhas alongadas tornando-se bolhas pequenas de gás no meio contínuo de líquido, conhecido como bolhas dispersas. Porém, se aumentar a vazão de gás, as bolhas alongadas irão coalescer gerando o escoamento anular, que tem como característica o gás escoando de forma contínua no centro da tubulação com um filme de líquido externamente.

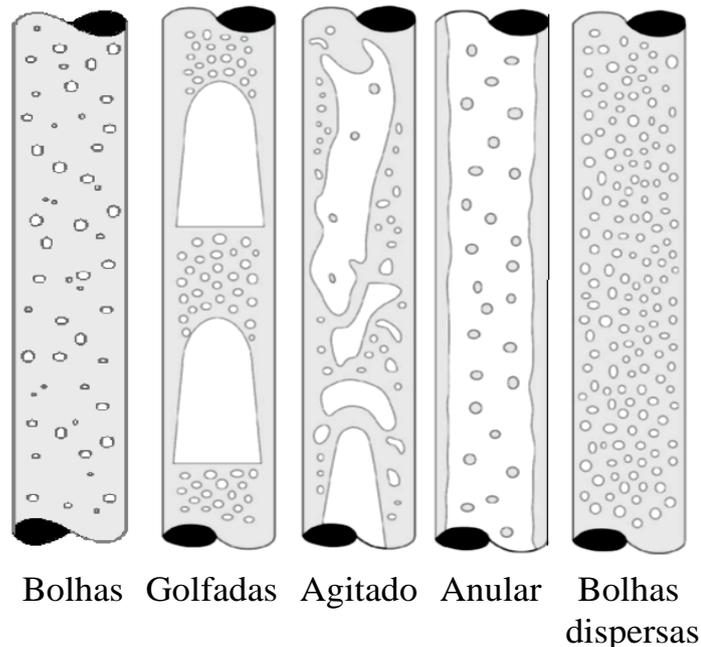
**Figura 2 - Padrões de escoamento em dutos horizontais.**



**Fonte: adaptado de Shoham (2006).**

A Figura 3 aponta que para dutos verticais, o escoamento é classificado, ainda segundo Shoham (2006), como bolhas, agitado (*churn*), bolhas dispersas, golfadas (*slug*) e anular. Os padrões de bolhas dispersas, golfadas e anular possuem as condições de vazões semelhantes ao caso horizontal. Porém, o escoamento vertical, por não ter a gravidade agindo na direção normal do escoamento, tende a ser simétrico.

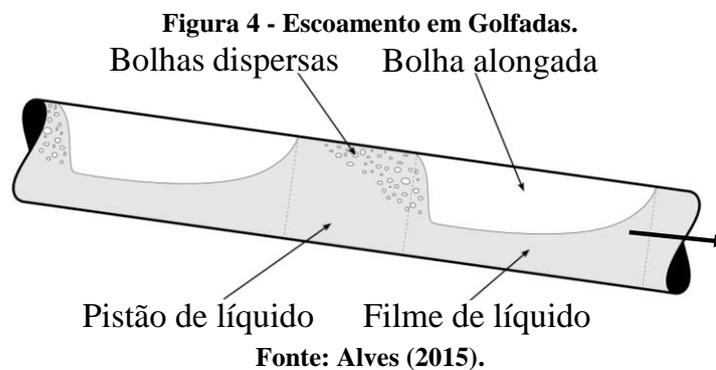
**Figura 3 - Padrões de escoamento em dutos verticais.**



**Fonte: adaptado de Shoham (2006).**

Dos diversos padrões citados, o escoamento em golfadas é o que gera maior interesse pois, segundo afirma Shemer (2003), além da complexidade é o de maior frequência nas linhas de produção e transporte de óleo e gás, pois observa-se sua ocorrência em uma ampla faixa de vazões de gás e de líquido. A estrutura das golfadas é esquematizada na Figura 4 e sua complexidade é determinada pela repetição intermitente de duas estruturas: uma de fase líquida contínua, denominada pistão, que pode conter bolhas dispersas; a outra é constituída de um bolsão de gás que ocupa quase a totalidade da seção transversal do tubo, com um filme de líquido escoando abaixo, denominada bolha alongada. A junção destas duas estruturas foi definida como sendo uma célula unitária que se repete ao longo do escoamento em golfadas (WALLIS, 1969).

Em uma tubulação horizontal ou inclinada, a região da bolha alongada apresenta um escoamento estratificado, pois o líquido escoar na parte inferior e o gás na superior. Para o caso vertical, a região da bolha é caracterizada por um escoamento anular com a bolha escoando no interior e o líquido no exterior. Independente da direção do escoamento, a região de líquido escoando próxima à bolha de gás é chamada de filme de líquido e muitas vezes é considerada sem gás disperso (FABRE e LINÉ, 1992).



O estudo do escoamento em golfadas é um desafio, tanto do ponto de vista experimental quanto numérico, por conta da dificuldade em caracterizar as estruturas do escoamento. Análises numéricas podem ser realizadas para prever o comportamento das golfadas, como o modelo de dois fluidos, de deslizamento (*drift flux*) ou o seguimento de pistões (*slug tracking*). Além do que, esses modelos necessitam de relações de fechamento para encontrar os parâmetros característicos do escoamento em golfadas, despertando interesse no desenvolvimento de estudos experimentais.

Com esta necessidade, os estudos experimentais sobre escoamento em golfadas tornaram-se frequentes nos últimos anos, como por exemplo Bertola (2003), Perez (2007), Júlia

et al. (2013), Rodrigues (2015), Bendiksen et al. (2018), entre outros. Muitos desses trabalhos tiveram como objetivo identificar experimentalmente as estruturas do escoamento em golfadas e as variáveis envolvidas, utilizando diversas técnicas de medição.

As variáveis do escoamento são dependentes das distribuições das fases e, como mencionado, essas distribuições são funções das geometrias das tubulações. Na produção de óleo e gás, os extensos dutos acompanham a geografia dos terrenos, com diversos acidentes no relevo (*hilly terrain*), que para escoamentos monofásicos não apresentam tanto problema, pois a energia potencial perdida em seções ascendentes é retomada em seções descendentes. Mas para o caso bifásico, variações no padrão de escoamento, acúmulo/drenagem de uma determinada fase ou aumento/diminuição da pressão podem ocorrer em regiões inclinadas e de cotovelo (BEGGS e BRILL, 1973). Sendo a maioria dos estudos concentrados no comportamento dos escoamentos sem variação no ângulo de inclinação ao longo da tubulação, poucos estudos analisaram o comportamento das golfadas em um escoamento em terrenos acidentados e com um comprimento de tubulação acima de 1000D, alcançando um escoamento completamente desenvolvido, onde suas características não sofrem mais os efeitos da entrada.

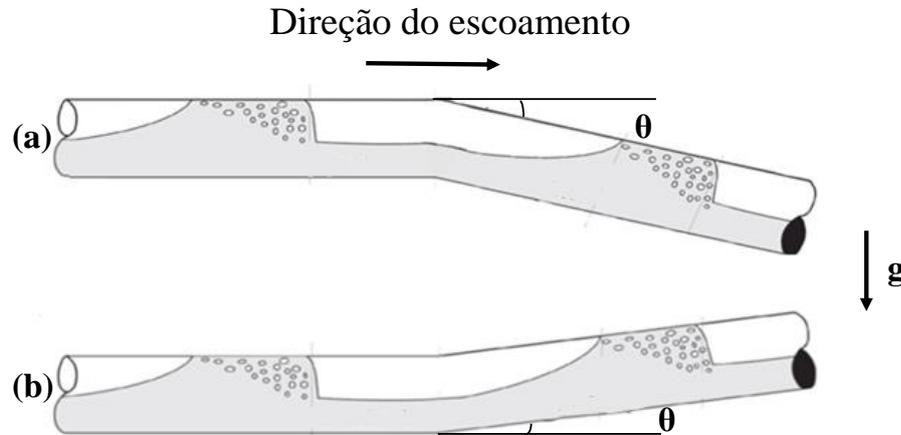
Assim, tornam-se importantes os estudos sobre o escoamento bifásico líquido-gás no padrão golfadas em tubulações com mudanças de direção, pois, as informações podem servir de auxílio para dimensionar equipamentos nas linhas de produção e transporte de petróleo, por exemplo.

## 1.1 OBJETIVO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um estudo experimental do escoamento bifásico de líquido e gás no padrão golfadas em um duto com leve mudança de direção. O duto teve três configurações: uma completamente horizontal de referência; uma com um trecho horizontal seguido por um trecho descendente, como mostrado na Figura 5 (a); a outra composta por um trecho horizontal e um trecho ascendente visto na Figura 5 (b).

As medidas experimentais foram realizadas no circuito do Núcleo de Escoamento Multifásico (NUEM) da UTFPR, em uma tubulação de acrílico transparente cujo diâmetro interno foi de 0,026 m e 35,6 m de comprimento, aproximadamente. Utilizaram-se três inclinações distintas para as regiões ascendentes e descendentes:  $\pm 3^\circ$ ,  $\pm 5^\circ$  e  $\pm 7^\circ$  com relação à horizontal. Os ângulos foram escolhidos para se ter uma leve inclinação como observado nas tubulações *off-shore* e de acordo com os diversos trabalhos encontrados na literatura. Os fluidos utilizados foram o ar e a água em temperatura ambiente e a pressão de saída era atmosférica.

**Figura 5 - Configuração da tubulação com mudança de direção.**



**Fonte: autoria própria.**

Na posse dos dados experimentais, foram analisadas a influência da mudança de direção nas evoluções da velocidade da bolha, dos comprimentos da bolha e do pistão, a fração de vazio na região da bolha e a frequência das golfadas o durante o escoamento. Além de analisar os fenômenos que geram as mudanças nestes parâmetros.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

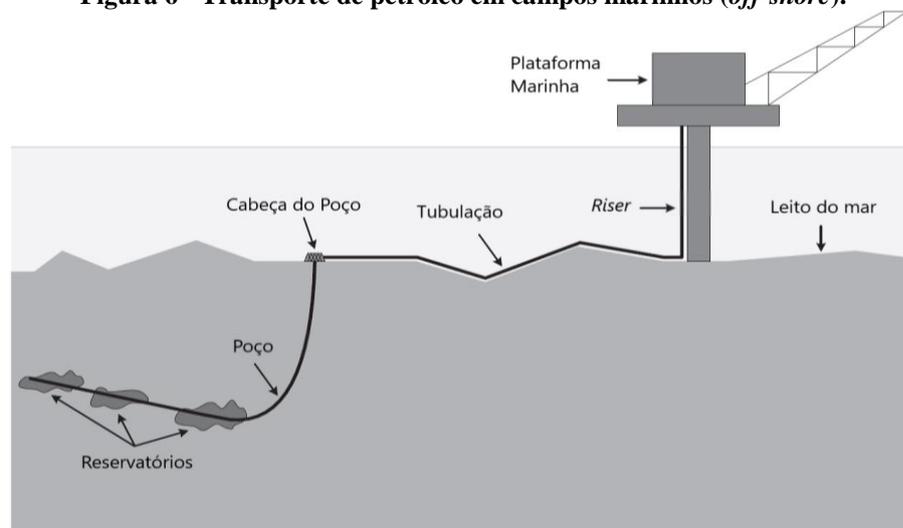
O escoamento bifásico no padrão golfadas é comumente encontrado em vários processos industriais, tendo um grande destaque na indústria petrolífera, uma vez que, esse tipo de padrão é observado sistematicamente nas linhas de transporte e produção de óleo e gás. Com a produção petrolífera à maiores profundidades e distâncias do continente, as tubulações são mais longas e são obrigadas a ajustarem-se ao relevo marinho provocando assim mudanças de direções, como pode ser observado na Figura 6.

Portanto, torna-se relevante o entendimento do comportamento do escoamento em golfadas com mudança de direção. O estudo experimental, que foi desenvolvido, avaliou o escoamento bifásico no padrão golfadas com leves mudanças de direção em tubulações com mais de 1000D de comprimento. Havia uma configuração de tubulação completamente horizontal para comparação, e as duas configurações inclinadas começavam com um trecho horizontal seguido do trecho inclinado, sendo um ascendente e outro descendente.

Tal estudo, levou a uma melhor compreensão dos fenômenos e parâmetros relacionados a esse cenário. Por conseguinte, poderá ser utilizado para otimizar a seleção de equipamentos e os projetos desenvolvidos na produção de óleo e gás, bem como fornecer dados e informações

que contribuam com a obtenção e validação da modelagem matemática e numérica do fenômeno em estudo.

**Figura 6 - Transporte de petróleo em campos marinhos (*off-shore*).**



Fonte: adaptado de Malekzadeh (2012).

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi estruturado em 5 capítulos. No primeiro capítulo, apresentou-se uma introdução sobre o escoamento bifásico em golfadas, os conceitos básicos e mostrou-se a importância em aplicações industriais, especialmente na produção de petróleo. Após a delimitação do problema, os objetivos a serem atingidos e a justificativa para a realização do estudo foram também apresentados.

No segundo capítulo, descreve-se a fundamentação teórica realizada dos temas relevantes para a construção do trabalho. A revisão bibliográfica concentrou-se nas definições de escoamento em golfadas, os seus principais parâmetros, nos fenômenos observados quando há mudança de direção e, por fim, nos estudos anteriores focados nos escoamentos bifásicos em golfadas com mudança de direção.

No capítulo três, é apresentada a metodologia experimental utilizada no desenvolvimento do trabalho. A princípio, descreve-se a bancada experimental destacando-se as características dos sensores resistivos utilizados para a detecção das fases. Mostra-se também a câmera de alta taxa de aquisição, usada para visualizar os fenômenos, auxiliando os resultados encontrados com os sensores resistivos. A seguir, mostram-se os procedimentos feitos na realização dos testes e os métodos utilizados para o processamento dos sensores resistivos.

Posteriormente, apresentam-se as análises estatísticas que foram utilizadas no trabalho e as análises de repetitividade das medições.

No quarto capítulo, serão mostrados os resultados encontrados a partir dos experimentos realizados no trabalho. Inicialmente, exibe-se a grade de testes utilizada junto com o mapa de fluxo, aferindo-se que todos os pontos estão na região do padrão golfadas. Em seguida, expõem-se os resultados obtidos para a tubulação completamente horizontal, usada como comparação para os resultados subsequentes com mudança de direção. Posteriormente, mostram-se os resultados para as configurações ascendentes, as mudanças que ocorrem em relação ao horizontal nos parâmetros do escoamento em golfadas, bem como os fenômenos observados. Seguidamente, mostram-se os resultados para as configurações descendentes, onde são abordados os pontos experimentais que ocorrem estratificação ou não, além de mostrar alguns fenômenos observados.

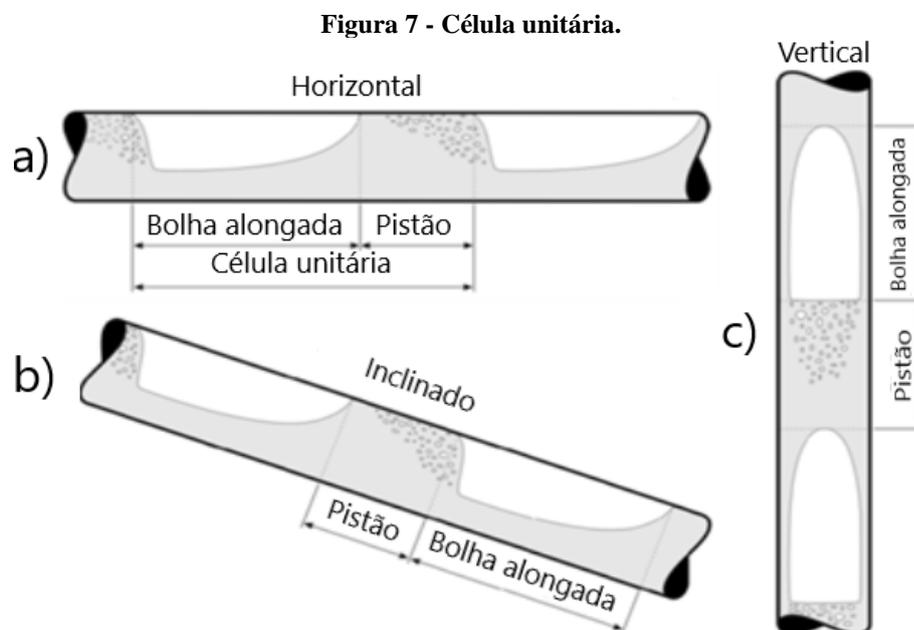
No último capítulo, é realizada a conclusão da dissertação, resumindo o estudo experimental que foi realizado. Discutem-se os principais resultados observados na influência da mudança de direção, além de sugestões a serem avaliadas em trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta uma revisão bibliográfica abordando os principais conceitos necessários para o desenvolvimento do trabalho e de estudos encontrados na literatura. Primeiramente, detalham-se o padrão de escoamento em golfadas e seus principais parâmetros. Em seguida, descrevem-se os fenômenos que ocorrem no escoamento devido à mudança de direção. Por fim, apresenta-se uma revisão dos estudos sobre escoamento em golfadas com mudança de direção.

### 2.1 ESCOAMENTO EM GOLFADAS

O escoamento em golfadas é observado em tubulações horizontais, verticais e inclinadas para ampla faixa de vazões de líquido e gás e, segundo Fabre (2003), possui como característica principal a intermitência das bolhas e dos pistões. A Figura 7 (a) demonstra a junção dessas duas estruturas que é definida como sendo uma célula unitária que se repete no tempo e no espaço (WALLIS, 1969).



Fonte: Alves (2015).

Shoham (2006) descreve que o escoamento em golfadas em dutos horizontais ou levemente inclinados, devido a ação da gravidade, possui uma disposição assimétrica das fases, com gás escoando em cima de um filme de líquido, como vistos nas Figuras 7 (a) e (b). No que se refere aos dutos verticais, a Figura 7 (c) exhibe que as estruturas possuem um arranjo anular, de maneira

simétrica, com o gás na região central e o líquido escoando entre a bolha de gás (bolha de Taylor) e a parede do duto.

O filme de líquido possui velocidade diferente da velocidade da bolha de gás. No caso vertical considera-se um comportamento de queda livre, ou seja, uma velocidade negativa e, nos casos horizontal e inclinado, escoo com velocidade inferior à bolha e ao pistão posterior. Essa diferença de velocidades, nos dois casos, provoca uma recirculação devido ao encontro entre o filme e o pistão que vem em seguida. Dependendo da intensidade desta recirculação, que é função da velocidade do líquido, pode-se provocar desprendimento de gás da bolha alongada, no formato de bolhas dispersas, gerando uma aeração do pistão (FABRE, 2003). Se a velocidade do líquido diminuir, a intensidade deste fenômeno diminui e gera uma região de cauda (fim da bolha) mais alongada e mais suave, não tendo assim recirculação, conforme afirmam Fagundes Netto et al. (1999).

Diversos estudos foram realizados para entender os fenômenos observados no escoamento em golfadas. Davies e Taylor (1950) estudaram o comportamento das bolhas no escoamento e observaram que o movimento da bolha é causado pelo movimento do líquido e pela ação da gravidade, por meio do empuxo e dos pesos dos fluidos. Os autores consideraram que há uma velocidade de deslizamento (*drift velocity*) entre as fases líquida e gasosa. A soma dessa velocidade de deslizamento ao efeito inercial do líquido aumenta a velocidade da bolha, segundo Nicklin et al. (1962). Moissis e Griffith (1962) estudaram um terceiro efeito, o efeito da esteira, causado pela recirculação do filme de líquido abaixo da bolha da frente e que acelera a bolha posterior. Esse efeito aumenta quanto menor for o comprimento do pistão que separa as bolhas.

Posteriormente, Dukler e Hubbard (1975), através de uma abordagem fenomenológica, propuseram um modelo que contribuiu no entendimento do comportamento do escoamento em golfadas como também os mecanismos físicos presentes. No modelo matemático, quando há o processo de formação da esteira na parte frontal do pistão, ocorre um aumento na queda de pressão, ao mesmo tempo que, o líquido é cedido ao filme seguinte. Eles constataram que a taxa de líquido capturado e cedido tornam-se iguais e o comprimento dos pistões torna-se praticamente constante, tendo assim um escoamento em golfadas desenvolvido.

## 2.2 PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO ESCOAMENTO EM GOLFADAS

O escoamento em golfadas é caracterizado com base em determinados parâmetros. Os parâmetros mais frequentes podem ser baseados na geometria do escoamento como o diâmetro

do tubo, o comprimento da bolha e do pistão. Podem ser cinemáticos, tais como as velocidades da frente da bolha ou média do pistão, ou então dinâmicos, como por exemplo o atrito das paredes da tubulação e as tensões superficiais para cada fase.

No presente trabalho, os seguintes parâmetros do escoamento em golfadas foram extraídos: comprimento do pistão e da bolha, velocidade de translação da bolha, a frequência de passagem das golfadas e as frações de gás tanto na bolha quanto no pistão. Nas seções posteriores, serão descritos esses parâmetros, além das velocidades superficiais do líquido e do gás.

### 2.2.1 Velocidades Superficiais do Líquido e do G188ás

As velocidades superficiais do gás ( $J_G$ ) e do líquido ( $J_L$ ) são definidas como sendo a razão entre a vazão volumétrica da fase ( $Q$ ) e a área da seção transversal do tubo ( $A$ ), como pode ser observado nas Equações (1) e (2). A velocidade superficial, desta maneira, representa a velocidade média de uma fase se estivesse escoando sozinha na tubulação. As velocidades superficiais são simples de mensurar pois, a área da seção é conhecida e as vazões podem ser medidas a partir de medidores de vazões, como o modelo *Coriolis* ou placa de orifício (SHOHAM, 2006).

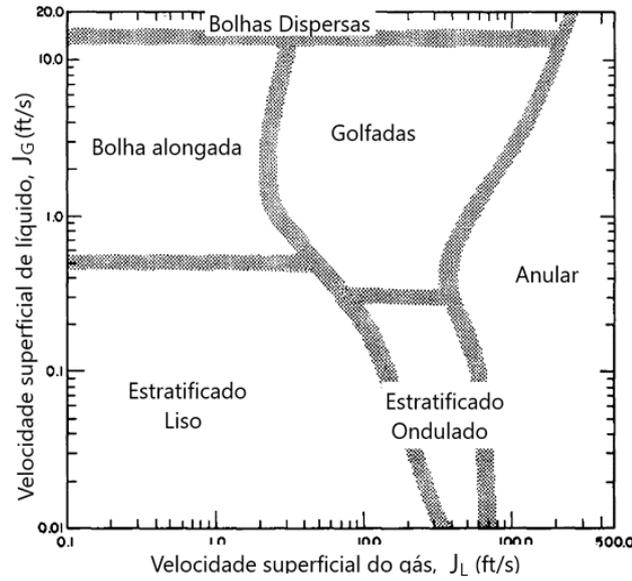
$$J_L = \frac{Q_L}{A} \quad (1)$$

$$J_G = \frac{Q_G}{A} \quad (2)$$

As velocidades superficiais do gás e do líquido podem ser utilizadas como coordenadas dos eixos de mapas de escoamento que servem para classificar os padrões de escoamento. Mandhane et al. (1974) foram um dos primeiros a trazer o mapa de fluxo em função das velocidades superficiais, como exemplificado na Figura 8, onde notam-se as linhas de transição entre os padrões de escoamento em função das velocidades superficiais.

Em alguns modelos, como o Modelo Homogêneo, utiliza-se a velocidade da mistura. A velocidade da mistura ( $J$ ) é definida como a soma das velocidades superficiais das duas fases, mostrada na Equação (3) (SHOHAM, 2006).

**Figura 8 - Mapa de fluxo.**



Fonte: adaptado de Mandhane et al. (1974).

$$J = J_L + J_G \quad (3)$$

No escoamento bifásico de líquido e gás, o líquido é tratado como incompressível, geralmente, e o gás como compressível. Portanto, a vazão volumétrica do líquido mantém-se constante e, por conseguinte, a velocidade superficial do líquido também se mantém constante ao longo de todo o escoamento. Porém, no caso do gás, a vazão volumétrica varia ao longo do escoamento em função da queda de pressão. Considerando o escoamento bifásico em um tubo circular, conforme a Figura 9, e aplicando-se a conservação da massa de gás em regime permanente em dois pontos da tubulação, resulta-se em:

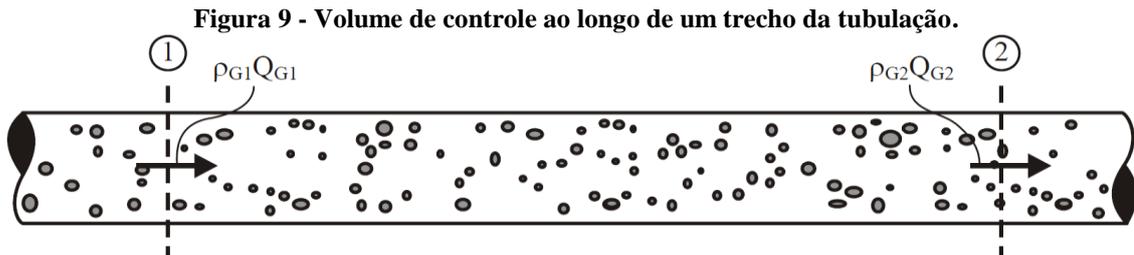
$$\rho_{G1} Q_{G1} = \rho_{G2} Q_{G2} \quad (4)$$

onde  $\rho_G$  é a massa específica do gás e os sub-índices 1 e 2 referem-se às seções da tubulação da Figura 9. Substituindo a Equação (2) em (4) obtém-se:

$$\rho_{G1} J_{G1} = \rho_{G2} J_{G2} \quad (5)$$

Sendo o escoamento com pressões baixas e temperaturas moderadas (i.e., pressão atmosférica e temperatura ambiente), pode-se considerar o ar como sendo um gás ideal, portanto, para um escoamento isotérmico, têm-se que:

$$\frac{P_G}{\rho_G} = cte \quad (6)$$



Fonte: Rodrigues (2009).

onde  $P_G$  é a pressão do gás. Portanto, a Equação (5) pode ser reescrita como:

$$J_{G1} P_{G1} = J_{G2} P_{G2} \quad (7)$$

ou, rearranjando:

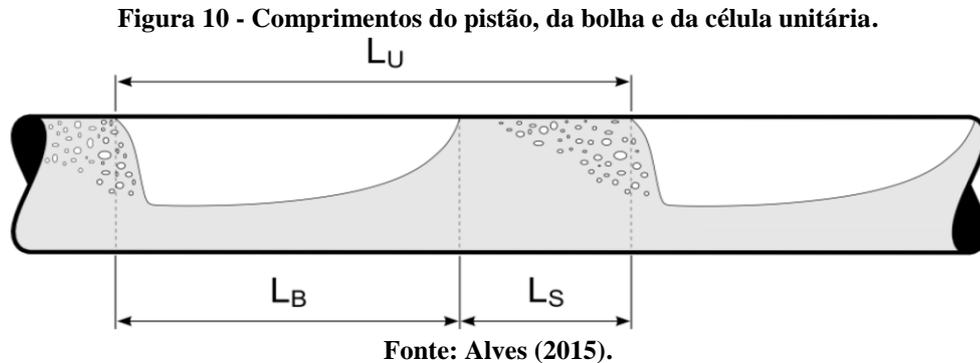
$$J_{G2} = \frac{P_{G1}}{P_{G2}} J_{G1} \quad (8)$$

Dessa maneira, a velocidade superficial do gás em qualquer ponto do escoamento é encontrada em função da velocidade superficial em um ponto anterior corrigida pela razão entre as pressões. A Equação (8) confirma que quando se varia a pressão ao longo do escoamento, a velocidade superficial também varia.

### 2.2.2 Comprimento da Bolha e do Pistão

Um dos conceitos mais utilizados para o estudo do escoamento em golfadas é o de célula unitária, introduzido por Wallis (1969), que simplifica a característica transiente do escoamento. Para tratar o escoamento em golfadas com base nesse conceito, faz-se necessário

o conhecimento dos comprimentos do pistão ( $L_S$ ) e da bolha ( $L_B$ ). Os comprimentos são esquematizados na Figura 10.



Como retrata a Figura 10, o comprimento da célula unitária ( $L_U$ ) é definido como a soma dos comprimentos da bolha e do pistão. Taitel (1987) argumenta que o comprimento do pistão é controlado por três fenômenos: os efeitos da entrada, a geometria da tubulação e a estabilidade da golfada. Portanto, para um escoamento desenvolvido, afastando-se da região de entrada do escoamento, o comprimento do pistão tende a se estabilizar, para tubulações sem alterações da geometria. Através de experimentos, observou-se que o comprimento estável do pistão de golfadas hidrodinâmicas é insensível às vazões de gás e de líquido para um dado diâmetro de tubulação e que, em escoamentos horizontais, esse comprimento está entre 12 e 30 vezes o diâmetro (DUKLER e HUBBARD, 1975).

Dukler, Maron e Brauner (1985) estabeleceram um modelo com o intuito de explicar a estabilidade do comprimento do pistão e os mecanismos físicos vinculados. O modelo define que o menor comprimento estável do pistão é aquele necessário para se estabelecer o perfil de velocidade completamente desenvolvido na região da traseira do pistão. Eles constataram a partir de dados experimentais e do próprio modelo que, para um escoamento vertical, o comprimento do pistão está entre 18 e 30D e para o horizontal entre 12 e 24D.

Além disso, Taitel (1987) aponta que o comprimento do pistão é inversamente proporcional a frequência de passagem de células unitárias, ou seja, quanto maior a frequência, menor serão os pistões gerados.

A geometria da tubulação também pode influenciar o comprimento do pistão, como mencionado anteriormente. Para casos de *hilly terrain*, ou seja, com mudança de direção, quando há vazões relativamente baixas de gás e líquido, os líquidos que acumulam nos cotovelos fazem com que o comprimento dos pistões aumente, alcançando valores maiores do que 30D por exemplo (TAITEL, 1987).

Barnea e Taitel (1993) propuseram um modelo capaz de calcular a distribuição do comprimento dos pistões em qualquer posição da tubulação. O modelo assume uma distribuição aleatória na entrada do tubo e calcula o possível aumento ou diminuição em cada comprimento de pistão de forma individual. Esse cálculo inclui o desaparecimento dos pistões curtos devido a coalescência das bolhas à medida que o escoamento se desenvolve. Segundo os autores, os pistões mais curtos são mais instáveis e que o processo de coalescência termina quando o pistão é grande o suficiente para que se estabeleça um perfil de velocidade na traseira. Desta maneira, eles assumiram que deve existir um comprimento mínimo e que o valor está entre 1,5 e 3 vezes o diâmetro.

### 2.2.3 Velocidade da Bolha

No escoamento em golfadas, a bolha transporta a maior parte do gás na célula unitária, portanto, faz-se necessário um estudo mais aprofundado da hidrodinâmica e principalmente da velocidade com que a bolha translada. Os primeiros estudos, encontrados na literatura, tiveram um foco na descrição do movimento de uma bolha em uma tubulação. Primeiro, Behringer (1936) considerou que há uma velocidade relativa local entre as fases em um escoamento vertical e ele propôs uma velocidade de translação de uma bolha ( $V_B$ ) segundo a Equação (9):

$$V_B = J + V_D , \quad (9)$$

onde observa-se a soma de dois fatores, um em relação à velocidade da mistura ( $J$ ) e  $V_D$  que seria a velocidade terminal ascendente de uma única bolha em um meio contínuo ou velocidade de deslizamento, como é comumente abordada. Posteriormente, Davies e Taylor (1950) fizeram uma análise desse movimento em uma coluna vertical deixando o líquido estacionário, sendo os fluidos nitrobenzeno e água.

Em seguida, Griffith e Wallis (1959) realizaram uma análise no movimento das bolhas de um escoamento paralelo de líquido e gás em um tubo vertical. Os autores fizeram uma contribuição para  $V_D$  do escoamento em golfadas usando considerações de continuidade e expressando  $V_D$  como a velocidade da bolha de Dimitrescu-Taylor, expresso na Equação (10):

$$V_D = C_{\infty} \sqrt{g D} , \quad (10)$$

onde  $D$  é o diâmetro,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $C_{\infty}$  é conhecido como parâmetro de deslizamento e tem como função quantificar a velocidade da bolha escoando através de um líquido estagnado. Para Griffith e Wallis (1959), o parâmetro de deslizamento é modelado pela Equação (11):

$$C_{\infty} = 0,35 \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_L}} , \quad (11)$$

onde  $\rho_L$  e  $\rho_G$  são as massas específicas do líquido e do gás, respectivamente.

Controvérsias ocorrem com relação ao parâmetro de deslizamento no escoamento horizontal. Por conta da ação da gravidade agir na direção normal ao escoamento e não gerar força de empuxo para deslocar a bolha, dessa forma não existiria  $C_{\infty}$ , segundo afirmam Gregory e Scott (1969) e Dukler e Hubbard (1975). Em contrapartida, Bendiksen (1984) e Nicholson, Aziz e Gregory (1978) afirmaram que, por ter deslizamento como resultado da diferença de elevação entre o nariz e o corpo da bolha, existe então  $C_{\infty}$  no escoamento horizontal. Em função dessas análises, correlações foram realizadas para calcular o parâmetro de deslizamento como os propostos por Weber (1981) e Bendiksen (1984), respectivamente apresentadas nas Equações (12) e (13):

$$C_{\infty} = 0,54 - 1,76 Eo^{-0,56} ; 2,5 \leq Eo \leq 200 \quad (12)$$

$$C_{\infty} = \begin{cases} 0,54 \cos \theta + 0,35 \operatorname{sen}^2 \theta ; & \text{se } Fr_j < 3,5 \\ 0,35 \operatorname{sen} \theta & ; \text{se } Fr_j \geq 3,5 \end{cases} , \quad (13)$$

onde  $Eo$  representa o número de Eötvös e exprime a relação entre as forças de empuxo e tensão superficial, que por definição é a Equação (14):

$$E_o = \frac{D^2 g (\rho_L - \rho_G)}{\sigma}, \quad (14)$$

onde  $\sigma$  representa a tensão superficial.

Portanto, a velocidade de deslizamento ( $V_D$ ) é a velocidade provocada pelo empuxo que resulta na propagação das bolhas (ALVES, SHOHAM e TAITEL, 1993). A velocidade de deslizamento também pode ser vista como a velocidade de translação de uma bolha através de um líquido estagnado (TAITEL e BARNEA, 1990).

Posteriormente, Nicklin, Wilkes e Davidson (1962) propuseram a Equação (15) para o cálculo da velocidade de translação da bolha ( $V_B$ ) em função da soma de dois termos. Um termo devido ao fluxo de líquido em volta da bolha e a velocidade de deslizamento (*drift velocity*).

$$V_B = C_o J + V_D \quad (15)$$

O termo  $C_o$  é conhecido como parâmetro de distribuição e define-se como sendo, aproximadamente, a razão entre a velocidade máxima e a velocidade média do líquido à frente da bolha (BENDIKSEN, 1984). Ressalta-se que os valores de  $C_o$  e  $V_D$  são dependentes das condições do escoamento.

O parâmetro de distribuição por ser dependente do perfil de velocidade varia para regimes de escoamento laminar e turbulento (ZUBER e FINDLAY, 1965). Nicklin, Wilkes e Davidson (1962) consideraram um escoamento turbulento completamente desenvolvido e sugeriram o valor de 1,2 para o  $C_o$ , pelo fato desse valor ser a razão entre a velocidade máxima e a velocidade média do escoamento turbulento. Por sua vez, por meio de um estudo experimental, Bendiksen (1984) propôs uma correlação, observada na Equação (16), em função da inclinação da tubulação:

$$C_o = \begin{cases} 1,05 + 0,15 \operatorname{sen}^2 \theta & ; \text{ se } Fr_j < 3,5 \\ 1,2 & ; \text{ se } Fr_j \geq 3,5 \end{cases}, \quad (16)$$

onde  $\theta$  refere-se a inclinação da tubulação em relação à horizontal e  $Fr_J$  é o número de Froude da mistura, um número adimensional que relaciona os efeitos de inércia e gravitacionais conforme a Equação (17):

$$Fr_J = \frac{J}{\sqrt{g D}} \quad (17)$$

Taitel e Barnea (1990) propuseram que a velocidade da bolha teria um terceiro efeito, além dos apresentados por Nicklin, Wilkes e Davidson (1962). Esse efeito seria o de esteira provocado pela traseira da bolha que está escoando à frente. Considerando então esses três efeitos, os autores propuseram uma nova relação para a velocidade de bolha, mostrada na Equação (18), mantendo a base das Equações (10) e (15):

$$V_B = \left( C_0 J + C_\infty \sqrt{g D} \right) (1 + h), \quad (18)$$

onde é incorporado uma constante de esteira,  $h$ , que quantifica o efeito da esteira. A constante de esteira é função da distância entre as bolhas consecutivas, e que aparece devido à mudança da velocidade máxima do escoamento quando as bolhas estão próximas, segundo Moissis e Griffith (1962). Foram propostas diversas correlações para o cálculo de  $h$ , que geralmente possuem a forma da Equação (19), variando-se as constantes  $a$  e  $b$ .

$$h = a \exp\left(-b \frac{L_s}{D}\right) \quad (19)$$

#### 2.2.4 Frequência da Célula Unitária

O conhecimento dos mecanismos governantes do escoamento em golfadas torna-se difícil devido à natureza intermitente e as grandes variações no espaço e no tempo das distribuições das fases (TRONCONI, 1990). Além disso, faz-se importante projetar os equipamentos de separação e de processamento que suportem as grandes variações de vazões de gás e líquido que ocorrem neste tipo de padrão (ZABARAS, 2000).

Com intuito de facilitar as análises, entender os mecanismos do escoamento em golfadas e projetar melhor os equipamentos, definiu-se a frequência de passagem da célula unitária como sendo o inverso do tempo que a célula demora para passar através de uma determinada seção, como expresso na Equação (20):

$$f_U = \frac{1}{T_B + T_S}, \quad (20)$$

onde  $T_B$  e  $T_S$  são os períodos de passagem da bolha e do pistão pela seção, respectivamente.

Baseando-se na hipótese de Fabre (2003), que propõe que toda a célula unitária translada sob a velocidade da frente da bolha ( $V_B$ ), pode-se obter os períodos de cada estrutura da célula unitária com base nos comprimentos:

$$T_B = \frac{L_B}{V_B}, \quad (21)$$

$$T_S = \frac{L_S}{V_B}, \quad (22)$$

Substituindo as Equações (21) e (22) na Equação (20) obtêm-se então:

$$\overline{f_U} = \frac{V_B}{L_B + L_S}, \quad (23)$$

Outra forma de analisar a intermitência do escoamento é entender a frequência das golfadas, que se faz importante por fornecer dados de entrada para modelos matemáticos. A frequência das golfadas é definida como a Equação (24):

$$\overline{f_S} = \frac{n_S}{\Delta t_S}, \quad (24)$$

onde  $n_s$  é o número de golfadas que passou em um sensor em uma determinada variação de tempo  $\Delta t_s$ , e como descrito em Conte et al. (2017),  $\bar{f}_s$  é diferente de  $\bar{f}_U$ , porém, são correlacionadas entre si segundo a Equação (28) a seguir:

$$\bar{f}_s = \frac{1}{\frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} \frac{1}{f_{U,i}}} \quad (25)$$

Assim como a Equação (23), que considera que a célula unitária se desloca com a velocidade da bolha, ao considerar que existe uma velocidade de bolha média então todas as golfadas deslocam-se com a mesma velocidade. Dessa forma, surge uma aproximação em valores médios para a frequência das golfadas em função da velocidade da bolha e do comprimento das estruturas, expressa na Equação (26):

$$\bar{f}_s \approx \frac{\bar{V}_B}{\bar{L}_B + \bar{L}_s} \quad (26)$$

A partir disso, várias correlações foram propostas para a frequência com base em empirismo e modelos mecanicistas. Um dos primeiros estudos empíricos da frequência em golfadas foi realizado por Gregory e Scott (1969). A partir de um estudo experimental do escoamento de água e dióxido de carbono em um tubo de 19 mm de diâmetro, eles utilizaram duas metodologias para calcular a frequência das golfadas. A primeira era de maneira simples contar de forma visual o número de golfadas que passavam em um período de tempo cronometrado. A segunda metodologia era contar o número de pulsos de pressão ocasionados quando se passava uma golfada em um dado período de tempo. A partir dessas duas análises, os autores propuseram uma correlação para a frequência com base na velocidade superficiais das fases e o diâmetro da tubulação, como pode ser observada na Equação (27):

$$f = 0,0226 \left[ \left( \frac{J_L}{gD} \right) \frac{19,75}{J} + J \right]^{1,2} \quad (27)$$

Posteriormente Heywood e Richardson (1979) realizaram um estudo experimental de um escoamento água e ar para um diâmetro de 0,042 m, utilizando medidores de absorção de raios- $\gamma$  para monitorar o *holdup* de líquido. Os autores propuseram então uma correlação com base no estudo de Gregory e Scott (1969), mostrado na Equação (28):

$$f = 0,0434 \left[ \frac{J_L}{J} \left( \frac{2,02}{D} + Fr_J \right) \right]^{1,02} \quad (28)$$

A partir de uma análise teórica, Tronconi (1990) propôs uma equação para a frequência das golfadas em escoamento invíscido em um canal. O autor relacionou à frequência as propriedades da evolução das ondas instáveis na região de entrada do escoamento, como mostrado na Equação (29):

$$f = 0,61 \left( \frac{\rho_G V_G}{\rho_L h_G} \right), \quad (29)$$

onde  $V_G$  é a velocidade do gás e  $h_G$  é a altura de equilíbrio do gás.

Anteriormente, Taitel e Dukler (1977) haviam proposto um modelo com capacidade de prever a frequência em tubulações horizontais e levemente inclinadas. Eles também consideraram a formação da golfada por conta das ondas instáveis que crescem sobre o filme estratificado, bloqueando a passagem do gás e gerando a golfada. Porém, Tronconi (1990) apontou uma contradição nesse modelo, uma vez que, Taitel e Dukler (1977) desconsideraram o termo devido ao efeito Bernoulli na equação de quantidade de movimento para o gás que descreve a formação das ondas instáveis que são precursoras das golfadas.

Zabaras (2000) também propôs uma correlação para a frequência da célula unitária a partir de um estudo experimental de um escoamento de água-ar e água-óleo em tubulações que variam o ângulo de 0° a 11° e dois diâmetros, um de 0,0254 m e outro de 0,203 m. A correlação proposta é dada pela Equação (30):

$$f = 0,0226 \left[ \left( \frac{J_L}{g D} \right) \frac{19,75}{J} + J \right]^{1,2} 0,836 + 2,75 \sen^{0,25} \theta \quad (30)$$

Uma forma adimensional de representar a frequência de passagem da célula unitária é através do número de Strouhal, sugerida por Azzopardi (1997), que descreve o mecanismo de um fluxo oscilante. Fossa, Guglielmini e Marchitto (2003) propuseram uma correlação baseada no número de Strouhal ( $St$ ) como mostrado na Equação (31):

$$St = \frac{fD}{J_G} = \frac{0,044 \left( \frac{J_L}{J} \right)}{1 - 1,71 \left( \frac{J_J}{J} \right) + 0,7 \left( \frac{J_J}{J} \right)^2} \quad (31)$$

Portanto, observa-se diversas correlações propostas para o cálculo da frequência na literatura. Antunes et al. (2014) fizeram uma análise das correlações encontradas na literatura e apontaram que há uma grande discrepância entre elas, com erros relativos médios entre 23,6 e 49,7%. Segundo os autores, esses erros acontecem, pois, os modelos são adequados para as condições experimentais ou teóricas nos quais foram desenvolvidas. Desta maneira, a predição da frequência da célula unitária ainda está em aberto na literatura.

### 2.2.5 Fator de Intermitência

A natureza intermitente do escoamento em golfadas caracteriza-se por não ser periódica nem no espaço nem no tempo. Porém, uma variável pode ser utilizada para ponderar, em termos médios, a ocorrência das bolhas alongadas e dos pistões de líquido. Esta variável é definida como fator de intermitência ( $\beta$ ) e é expressa levando em consideração os tempos de ocorrência dessas estruturas conforme a Equação (32):

$$\beta = \frac{T_B}{T_B + T_S} \equiv \frac{T_B}{T_U} \quad (32)$$

ou seja, por definição a Equação (32) significa a razão entre o tempo em que uma bolha alongada leva para passar por uma seção e o tempo que a célula unitária leva para passar pela mesma seção (LIMA e ROSA, 2014).

Utilizando a mesma hipótese proposta por Fabre (2003), que toda a célula unitária translada sob a velocidade da frente da bolha ( $V_{TB}$ ), pode-se reescrever a Equação (32) substituindo as Equações (21) e (22) na forma da Equação (33):

$$\beta = \frac{L_B}{L_B + L_S} \equiv \frac{L_B}{L_U} \quad (33)$$

O fator de intermitência possui uma característica matemática intrínseca que o limita entre os valores 0 e 1 ( $0 \leq \beta \leq 1$ ), porém, do ponto de vista físico, o valor do  $\beta$  não pode atingir os extremos 0 e 1. Isto deve-se ao fato de que, para  $\beta \rightarrow 1$  o padrão de escoamento tende a mudar para o escoamento estratificado ou para o anular, por outro lado, para  $\beta \rightarrow 0$  o padrão de escoamento tende a ser do tipo bolha dispersas. Nesses termos, para o escoamento intermitente, os valores para esse fator são observados como sendo  $0,2 \leq \beta \leq 95$  (BUENO, 2010).

### 2.2.6 Frações de Líquido e de Gás

Por definição, a fração de líquido ( $H_L$ ) é a fração da área que é ocupada pelo líquido. Analogamente, a fração de gás ou fração de vazio ( $R_G$ ) representa a fração da área que é ocupada pela fase gasosa (SHOHAM, 2006). Ou seja, a fração de uma fase é a razão entre a área que essa fase ocupa e a área da seção transversal, como expressada nas Equações (34) e (35):

$$H_L = \frac{A_L}{A}, \quad (34)$$

$$R_G = \frac{A_G}{A} \quad (35)$$

Dessa maneira, para a região da bolha e do pistão são representadas, respectivamente, pelas Equações (36) e (37):

$$H_{LB} = 1 - R_{GB} = \frac{A_{LB}}{A}, \quad (36)$$

$$H_{LS} = 1 - R_{GS} = \frac{A_{LS}}{A}, \quad (37)$$

onde  $A_{LB}$  e  $A_{LS}$  correspondem, respectivamente, às áreas que são ocupadas pelo líquido nas regiões da bolha e do pistão.

A fração de líquido no pistão é importante para o escoamento em golfadas pois seu conhecimento é necessário para o cálculo da queda de pressão no escoamento inclinado. Para isso, alguns modelos foram propostos para o cálculo da fração de líquido no pistão.

Um dos primeiros modelos foi proposto por Gregory, Nicholson e Aziz (1978) a partir de experimentos do escoamento em golfadas horizontais em tubulações com dois diâmetros diferentes, 0,0258 m e 0,0512 m. Eles desenvolveram uma correlação empírica que relaciona a fração de líquido no pistão com a velocidade da mistura:

$$H_{LS} = \frac{1}{1 + \left( \frac{J}{8,66} \right)^{1,39}} \quad (38)$$

Outros estudos e correlações foram desenvolvidos posteriormente, modificando os parâmetros que segundo os autores são relacionáveis com a fração de líquido no pistão. Barnea e Brauner (1985), por exemplo, propuseram um modelo que estima a fração de líquido considerando que há gás disperso no pistão na mesma quantidade que no escoamento com bolhas dispersas para o caso vertical. As autoras adicionaram números adimensionais com o intuito de avaliar diversos parâmetros ao mesmo tempo, como o número de Froude, de Reynolds e de Bond, como observa-se a seguir na Equação (39):

$$H_{LS} = 1 - 0,058 \left[ 0,605 \left( \frac{Bo}{Re_s} \right)^{0,1} Fr_j^{1,2} - 0,725 \right]^2 \quad (39)$$

onde  $Re_s$  representa o número de Reynolds do pistão e  $Bo$  o número de Bond. O número de Reynolds representa a relação entre os efeitos inerciais e viscosos e é expresso conforme a Equação (40). O número de Bond é utilizado nas análises dos escoamentos dos fluidos e

caracteriza a relação entre as forças gravitacionais e de tensão superficiais ou de interface, como mostrado na Equação (41).

$$\text{Re}_j = \frac{\rho J D}{\mu} \quad (40)$$

$$\text{Bo} = \frac{\Delta\rho g l^2}{\sigma} \quad (41)$$

### 2.3 ESCOAMENTO EM GOLFADAS COM MUDANÇA DE DIREÇÃO

Além do comportamento das golfadas e seus parâmetros, faz-se necessário entender os processos que originam esse tipo de escoamento. Nesse sentido, existem dois mecanismos que podem gerar as golfadas: o hidrodinâmico, que está relacionado aos fenômenos de entrada, e o topográfico, que está associado a mudança de direção em uma tubulação (TAITEL e BARNEA, 2000).

As golfadas hidrodinâmicas horizontais são formadas a partir da instabilidade das ondas criadas no escoamento estratificado, como mostrado na Figura 11. Essas instabilidades são definidas na literatura como instabilidades de Kelvin-Helmholtz (K-H).

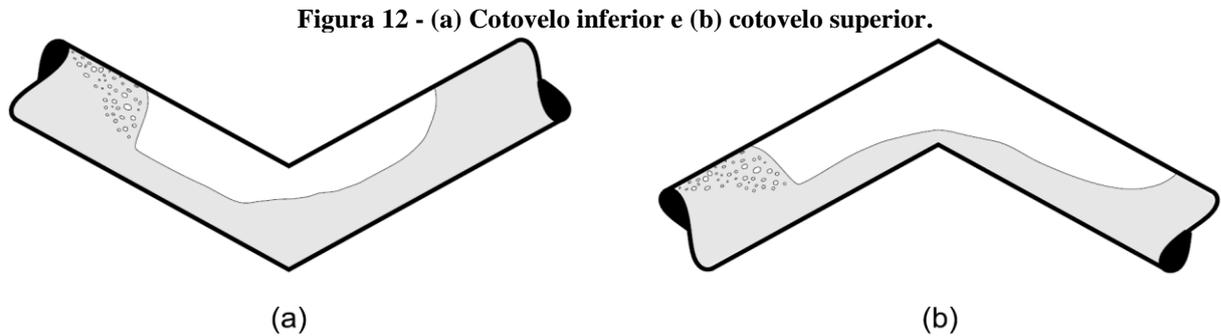


Fonte: adaptado de Chelski (2012).

O escoamento é estratificado na região de entrada de uma tubulação horizontal e quando percorre em direção a jusante, devido as perturbações provocadas pelas vazões de cada fase, ocorre o surgimento de ondulações. Quando a amplitude dessas ondulações faz com que a fase líquida alcance o topo da seção transversal, forma-se então uma barreira à passagem do gás e dessa maneira estabelece-se o escoamento em golfadas (KORDYBAN e RANOV, 1970).

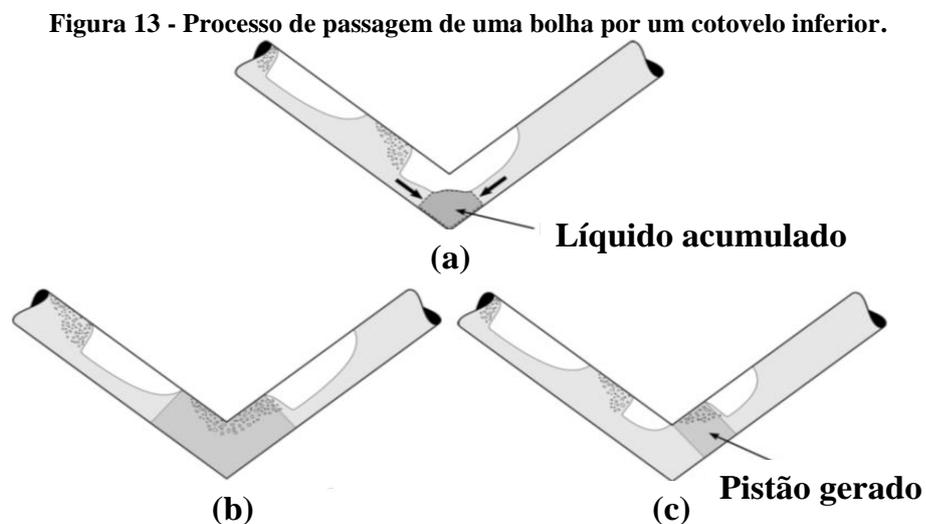
As golfadas induzidas pela topografia da região ocorrem sob a influência da mudança de direção da tubulação. As tubulações para adequarem-se ao relevo possuem cotovelos que

interferem na formação das golfadas. Consideram-se duas situações que mudam a direção do escoamento: a primeira quando o escoamento passa por um cotovelo inferior e a segunda quando passa por um cotovelo superior, conforme mostram as Figuras 12 (a) e (b), respectivamente (TAITEL e DUKLER, 1976).



Fonte: Alves (2015).

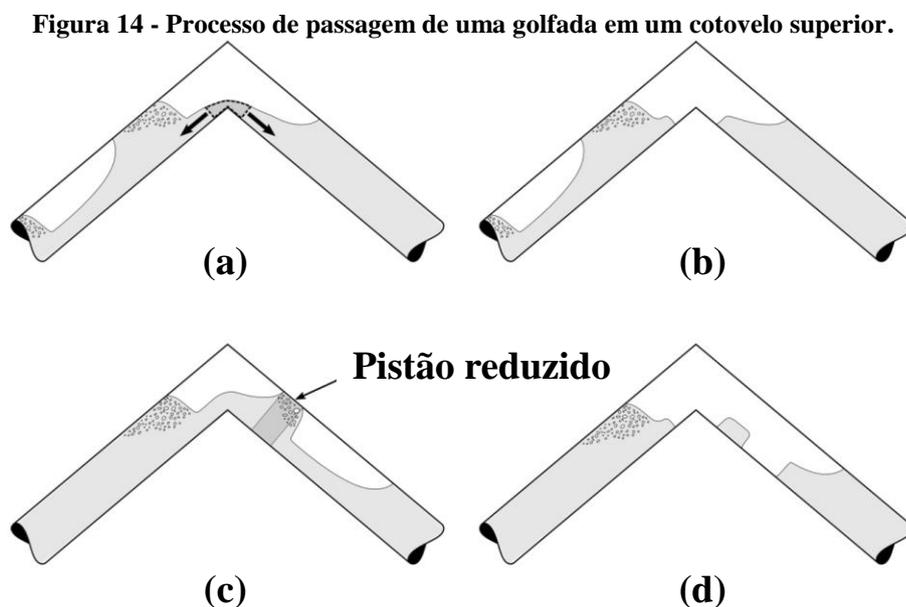
A Figura 13 (a) mostra a passagem de uma bolha através de um cotovelo inferior e observa-se que a fase líquida se acumula de forma gradual no cotovelo. Esse fenômeno ocorre, pois, o filme de líquido sob ação da gravidade escoar na direção do cotovelo, tanto antes quanto depois dele. A Figura 13 (b) mostra que, se o volume de líquido que ficou acumulado no cotovelo não for suficiente para criar uma barreira à passagem de gás que seja estável, então essa quantidade de líquido acumulada ficará retida no cotovelo até que venha um novo pistão e carregue-a. Porém, se essa quantidade for suficiente para bloquear a passagem de gás, formar-se-á então um novo pistão dividindo a bolha que está passando pelo o cotovelo em duas, como observa-se na Figura 13 (c).



Fonte: Alves (2015).

O novo pistão que é formado segue o mecanismo de instabilidade de K-H. O mecanismo considera que, o líquido que fica acumulado gera uma onda nessa região e, por conseguinte, diminui a área de passagem do gás. Com a diminuição da área, há um aumento na velocidade local. Essa aceleração do gás provoca uma redução da pressão que resulta em uma força de sucção no líquido, chamada de efeito de Bernoulli. Resumidamente, quando o efeito de Bernoulli for suficiente para aumentar a onda até bloquear a passagem do gás, gera-se um novo pistão.

Para o caso do cotovelo superior, como pode ser visto na Figura 14 (a), o filme do líquido no momento em que está passando pelo cotovelo tende a escoar para baixo devido a ação da gravidade, tanto a montante quanto a jusante. Esse efeito tende a drenar o filme de líquido no cotovelo e com isso ele torna-se descontínuo, como exemplifica a Figura 14 (b). Portanto, o suprimento do líquido para o pistão posterior é cortado e ele não captura esse líquido à frente. A Figura 14 (c) mostra posteriormente que, como o líquido continua sendo cedido para o filme na sua traseira, o comprimento do pistão é reduzido gradativamente. No caso do pistão não ter o tamanho suficiente, esquematizado na Figura 14 (d), ele extingue-se e o escoamento possuirá uma região estratificada seguida de uma região em que existe somente gás, que é chamada de pistão de gás.



Fonte: Alves (2015).

Dessa maneira, se ocorrer a extinção sucessiva dos pistões, na teoria, o escoamento possuiria regiões estratificadas com pistões de gás, porém o que se observa de fato é que ocorre uma transição do escoamento em golfadas para o estratificado. Taitel, Sarica e Brill (2000)

identificaram outro caso em que acontece a transição do escoamento em golfadas para o estratificado. Esse caso acontece em regiões descendentes onde o filme escoar com uma velocidade maior que o pistão. Portanto, nessas condições, a traseira da bolha não fornece líquido para o filme posterior, porém a frente do pistão cede líquido para o filme à frente e dessa forma a bolha penetra no pistão, estabelecendo o escoamento estratificado.

### 2.3.1 Revisão de Trabalhos com Mudança de Direção

Nesta seção, serão descritos os estudos numéricos e experimentais, que descrevem o comportamento e a dinâmica do escoamento em golfadas para tubulações com trechos que apresentam mudança de direção.

Singh e Griffith (1970) foram uns dos primeiros a realizarem estudos sobre o escoamento em golfadas com tubulações horizontais e inclinadas. Eles mediram a queda de pressão e o *holdup* do líquido em tubulações com diâmetros de 0,626, 0,822, 1,063, 1,368 e 1,6 polegadas e com ângulos de  $0^\circ$ ,  $\pm 5^\circ$ ,  $\pm 10^\circ$  e  $\pm 15^\circ$ . Os autores propuseram um modelo de queda de pressão, para o escoamento bifásico em golfadas para o caso de tubulações inclinadas, que tenta prever o gradiente de pressão total devido à gravidade e à tensão de cisalhamento na parede da tubulação. Os autores afirmaram que o gradiente de pressão diminui com a decréscimo da inclinação e que quando a inclinação aumenta, acresce-se a contribuição da queda de pressão devido à gravidade, constituindo assim a porção maior da queda de pressão total. Os autores encontram uma equação para a velocidade da bolha em função dos seus dados experimentais, porém eles afirmam que a inclinação não interfere nos valores de velocidade de translação na bolha.

Vermeulen e Ryan (1971) estudaram o escoamento bifásico ar-água em uma tubulação horizontal e inclinada de 0,0127 m de diâmetro. Eles realizaram medidas de gradiente de pressão, flutuações das pressões, velocidade e frequência das golfadas. A partir dos dados obtidos, os autores desenvolveram um modelo semi-empírico, com base no modelo de Kordyban (1961), para o cálculo de queda de pressão a partir da frequência das golfadas. Os autores observaram que as flutuações da pressão provocadas pela passagem das estruturas das golfadas são mais relevantes em baixas pressões, pois para altas pressões essas flutuações são pequenas frações da pressão e deve ser desprezada. Segundo os autores, as inclinações de  $\pm 7^\circ$  não exerce muita influência na queda de pressão e na velocidade das golfadas.

Bonnecaze, Erskine Jr. e Greskovich (1971), simultaneamente, também desenvolveram um modelo para a queda de pressão com base em um estudo do escoamento bifásico em

golfadas em uma tubulação inclinada com  $\pm 10^\circ$  com relação a horizontal. O modelo leva em consideração a inclinação e as forças de gravidade que agem na golfada, gerando uma equação para o gradiente de pressão em uma célula unitária. Os autores também propuseram expressões para calcular o *holdup* de líquido no pistão, o *holdup* de líquido na região da bolha e o fator de atrito do escoamento em golfada. No referido modelo, as células unitárias eram consideradas idênticas, portanto era calculado, na verdade, uma célula unitária média para um dado escoamento. Os autores também propuseram que a queda de pressão em uma célula unitária surge da soma de três termos: a pressão na zona de mistura, a pressão da região do pistão e a pressão na região da bolha. Porém, nos seus cálculos, eles consideraram a queda de pressão na bolha insignificante, por ser baixa em relação a do pistão. Eles também consideraram nula a queda de pressão na região de mistura por falta de conhecimento sobre ela, apesar de considerarem importante.

Beggs e Brill (1973) realizaram um estudo em escoamento gás-líquido em tubulações inclinadas para avaliar o efeito dessas inclinações no *holdup* de líquido e na queda de pressão. As medidas experimentais foram realizadas para padrões de escoamento diferentes com ar e água em uma tubulação de 27,4 m de comprimento e diâmetros de 1 e 1,5 pol, com ângulos de inclinação variando entre  $-90^\circ$  a  $+90^\circ$ . O modelo apresentado pelos autores é baseado no padrão de escoamento como se estivesse escoando na direção horizontal, porém correções são feitas para as mudanças no *holdup* do líquido quando se modifica a inclinação. Portanto, caso ocorra mudança de padrão de escoamento na região inclinada em relação à uma tubulação horizontal, este modelo vai divergir. Além disso, segundo Economides et al. (2013), este modelo é recomendado para cálculos apenas em tubulações que não são próximas da direção vertical.

Greskovich e Cooper (1975) desenvolveram uma correlação para o *holdup* do líquido em escoamentos bifásicos e inclinados. A tubulação utilizada possuía 79,4 mm de diâmetro e 9,39 m de comprimento, com possibilidade de inclinação entre  $1^\circ$  a  $10^\circ$  em relação à horizontal. Os autores também utilizaram dados de outros autores com diâmetros semelhantes para propor a correlação, totalizando 3 diâmetros e 5 inclinações diferentes. A correlação proposta pelos autores é baseada na correlação proposta por Bonnacaze, Erskine Jr. e Greskovich (1971), com a adição no número de Froude da mistura, assumindo que para escoamentos inclinados a velocidade de translação da bolha é uma função direta do ângulo de inclinação.

Schmidt, Brill e Beggs (1980) propuseram e desenvolveram equações que podem calcular o comprimento dos pistões, frequência da célula unitária e também as flutuações que ocorrem na pressão. A geometria da tubulação utilizada consistiu de um duto inclinado seguido

por um *riser* acoplado a um separador que mantinha a pressão constante. Os autores comentam que para inclinações negativas e baixas vazões das fases, a força predominante é a gravidade, sendo o atrito praticamente desprezível.

Barnea et al. (1980) realizaram um estudo experimental em um sistema ar-água com tubulações de 0,0195 m e 0,0255 m de diâmetro com variações de inclinações maiores que  $\pm 10^\circ$  em relação a horizontal. Os autores compararam os resultados obtidos com o modelo proposto por Taitel e Dukler (1976), que tenta prever as transições entre padrões de escoamento para tubulações horizontais e inclinadas, e observaram que para inclinações maiores que  $\pm 10^\circ$  o modelo tendia a acertar, mas quantitativamente não era preciso. Avaliando as definições dos padrões de escoamento e os fenômenos que ocorrem nas transições para esses casos, os autores discutiram os efeitos da inclinação que afetam principalmente as transições do escoamento estratificado para o intermitente ou para o anular. Por exemplo, em tubulações inclinadas descendentes, o líquido escoava mais rapidamente e dessa forma possui uma menor altura de líquido devido as forças gravitacionais descendentes, portanto, fazem-se necessárias maiores vazões de líquido e gás para que o padrão estratificado mude para o intermitente. Este fenômeno faz com que a região de escoamento estratificado, no mapa de fluxo, aumente conforme aumenta-se o ângulo de inclinação descendente.

Além disso, Barnea et al. (1980) observaram que para inclinações menores que  $-5^\circ$  não há mais o padrão estratificado liso, ou seja, somente há escoamento ondulado devido as instabilidades provocadas pelo aumento da velocidade devido os efeitos gravitacionais. Para o caso do escoamento inclinado ascendente, para uma baixa inclinação o escoamento intermitente torna-se mais suscetível a ocorrer em uma maior faixa de vazões de líquido e gás, tomando o lugar do escoamento estratificado. Tanto que, para inclinações maiores do que  $+10^\circ$ , não se observa este tipo de escoamento.

Mukherjee e Brill (1983) realizaram um estudo experimental em uma tubulação em “U” com a seção de teste de 0,038 m de diâmetro e 58,2 m de comprimento podendo variar a angulação de  $0^\circ$  a  $\pm 90^\circ$  em toda a seção. Os autores utilizaram óleo (querosene e óleo lubrificante) e água como fluidos de trabalho e sensores capacitivos para medir a série temporal do *holdup* de líquido. Os autores discutem que existe uma dependência entre o ângulo de inclinação e o deslizamento entre as fases, que é um dos fatores responsáveis pela aceleração da bolha. Pois, a diferença das forças de empuxo agindo sobre as fases pode aumentar ou diminuir com a inclinação, gerando aceleração ou não da bolha.

Outras análises feitas por Mukherjee e Brill (1983) exploram o fato de que as forças gravitacionais na fase líquida, que é a mais densa, promovem o escoamento contrário quando

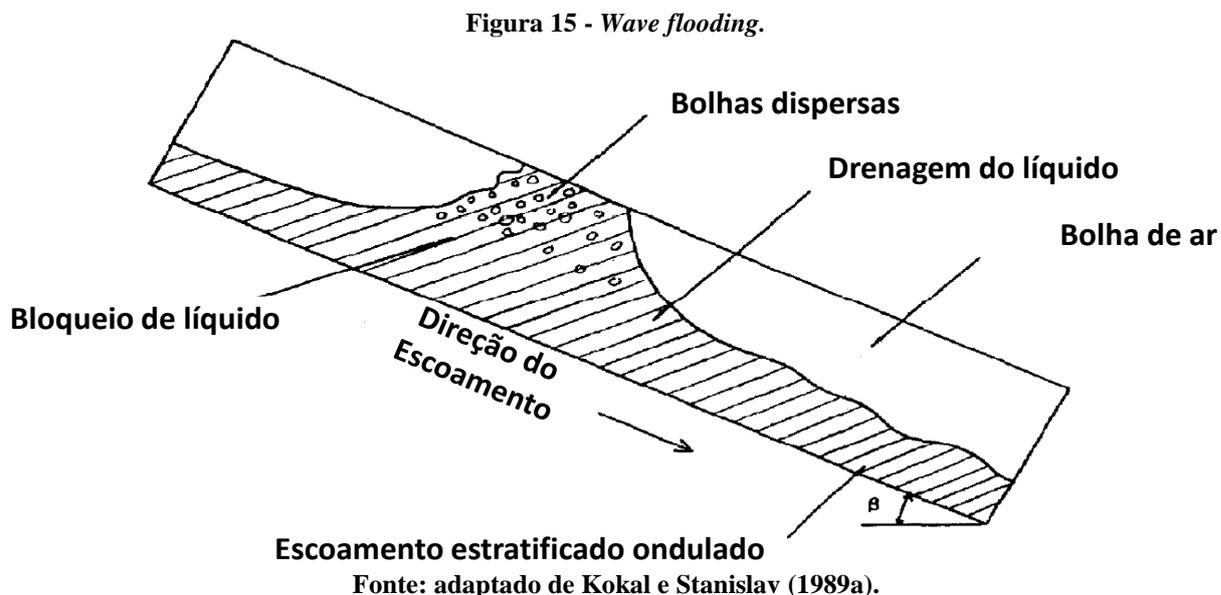
as forças de atrito e empuxo falham em auxiliar o líquido em um escoamento ascendente. Por outro lado, no escoamento descendente o mesmo efeito faz com que o líquido se mova mais rápido do que o gás. Isto posto, enquanto o empuxo sempre causa uma aceleração da fase gasosa relativa à fase líquida, a gravidade sempre tende a fazer com que o líquido escoe mais rápido que o gás. Os autores ainda propuseram uma correlação empírica para o *holdup* de líquido para todos os padrões com base nos próprios dados, ou seja, para inclinações entre  $-90^\circ$  e  $+90^\circ$ , para dois tipos de óleo como a fase líquida e ar como gasosa. A correlação é calculada a partir de dados de entrada como as velocidades superficiais das fases, gravidade e inclinação da tubulação, bem como das propriedades dos fluidos, como a viscosidade dos óleos, densidade e tensão superficial de cada fase.

Pouco tempo depois, Bendiksen (1984) realizou um estudo experimental com escoamento ar-água em tubulações inclinadas com ângulos variando de  $-30^\circ$  até  $+90^\circ$ , com diâmetros entre 0,019 m a 0,05 m e comprimento de 17 m no total. Ele fez uma análise da taxa de propagação de bolhas alongadas nessas tubulações e propôs uma correlação para a velocidade de translação da bolha. O autor utilizou a abordagem com base em Nicklin, Wilkes e Davidson (1962), representada na Equação (15), porém fazendo ajustes nos parâmetros de deslizamento e distribuição para que fossem levados em consideração os efeitos da inclinação, como explicitados nas Equações (13) e (16).

Stanislav, Kokal e Nicholson (1986) desenvolveram um estudo experimental do escoamento bifásico (ar-óleo) em golfadas em uma seção inclinada ascendente de 25 m de extensão e 0,026 m de diâmetro. A tubulação podia ser ajustada em inclinações até  $\pm 10^\circ$ . Os autores concluíram que o gradiente de pressão é alterado de acordo com a inclinação para baixas velocidades superficiais das fases, pois para esse caso a queda de pressão é dominada pela pressão hidrostática. Por outro lado, para altas velocidades superficiais a queda de pressão se torna quase independente do ângulo de inclinação, uma vez que, ela é basicamente determinada pelo termo de atrito.

Ainda utilizando os mesmos fluidos e a mesma bancada experimental apresentados no parágrafo acima, Kokal e Stanislav (1989a) realizaram estudos utilizando agora 3 diâmetros (0,026, 0,051 e 0,076 m) para 7 inclinações diferentes ( $0$ ,  $\pm 1$ ,  $\pm 5$  e  $\pm 9^\circ$ ). Os autores propuseram uma classificação para os padrões de escoamento e as suas transições, totalizando 5 tipos mais abrangentes e 15 subtipos. Dentre estes tipos, vale ressaltar a inserção de um padrão de transição do escoamento estratificado para o intermitente definido como *Wave Flooding*. Este padrão de transição ocorre somente em escoamentos descendentes onde durante o escoamento estratificado ocorre bloqueios de líquido de forma estacionária, aproximando-se a

um pistão do escoamento em golfadas. Porém, no caso descendente, o líquido é drenado mais rapidamente provocando uma mudança na traseira da bolha, fazendo com que se assemelhe a um nariz e o contrário acontece com a próxima bolha, que faz gerar esteiras e retiradas de bolhas dispersas do nariz, gerando uma espécie de traseira, como demonstrado na Figura 15.



Kokal e Stanislav (1989a) também propuseram mapas de fluxo justamente com a avaliação dos efeitos dos diferentes diâmetros e inclinações. Os autores observaram que para o caso ascendente, as regiões de transição de um padrão para o outro não se difere do caso horizontal, com exceção do escoamento estratificado que possui sua região ligeiramente encolhida. Por outro lado, no caso descendente, os escoamentos mostram-se diferentes em relação ao horizontal. Por exemplo, a região do escoamento estratificado expande consideravelmente do horizontal para  $-1^\circ$ , fazendo com que a região intermitente diminua com o aumento do ângulo descendente.

Fundamentando-se nas teorias de que para baixas vazões de líquido e gás, o escoamento é bastante afetado pela presença de tubulações com *hilly terrain*, que Taitel, Shoham e Brill (1990) propuseram um modelo para predizer o comportamento dos escoamentos nesse sistema. As baixas vazões propiciam que os efeitos gravitacionais (pressão hidrostática) prevaleçam como apontado por Stanislav, Kokal e Nicholson (1986), portanto na presença de vales e picos, o líquido e o gás tendem a se acumular nessas estruturas, respectivamente. Os autores propuseram um modelo em quase-equilíbrio com base no modelo de Schmidt, Brill e Beggs (1980), porém expandindo o modelo para múltiplas regiões ascendentes e descentes.

Scott e Kouba (1990) desenvolveram metodologias a partir de isogramas das propriedades do escoamento em golfadas para examinar, predizer e modelar a existência das golfadas, os comprimentos dos pistões e uma simplificação para o filme de líquido em equilíbrio sob a bolha alongada. Os autores ainda aplicaram seus métodos para determinar o escoamento em golfadas em uma tubulação real, horizontal e levemente inclinada, no mar do norte da Noruega, com extensão e diâmetro de 471,6 m e 0,076 m, respectivamente. Os autores apresentaram uma relação para a transição do escoamento em golfadas para o tipo bolhas dispersas como sendo em função da razão entre o comprimento da bolha e o comprimento da célula unitária. Quando esta relação tende a zero, não há mais bolhas separadas por pistões, logo não há mais escoamento em golfadas. Os autores também comentam que quando o escoamento em golfadas entra em uma região descendente o comprimento do pistão tende a diminuir. Por sua vez, no caso ascendente o comprimento do pistão tende a aumentar. Porém, com o aumento das vazões esse efeito da inclinação não é tão sentido no comprimento dos pistões. Por fim, os autores propõem uma metodologia para projetar tubulações reais que possam trabalhar com escoamentos multifásicos de maneira viável.

Wood (1991) desenvolveu um modelo mecanicista utilizando a abordagem da célula unitária para um *hilly terrain*. O modelo mecanicista baseou-se na análise de dados empíricos e no tratamento do escoamento considerando o estado de quasi-equilíbrio. A partir do modelo, o autor determinou a velocidade crítica do gás para que haja a retirada do líquido no cotovelo, a acumulação de líquido máxima e a frequência da célula unitária no cotovelo. Os resultados obtidos pelo modelo foram comparados então com dados experimentais e apresentaram uma boa conformidade.

Posteriormente, Zheng, Brill e Shoham (1992) realizaram estudos experimentais com escoamento em golfadas em um *hilly terrain* com uma geometria horizontal seguida de uma seção ascendente e depois descendente. A tubulação apresentava um diâmetro de 0,0763 m e um comprimento de 420,3 m. O circuito foi instrumentado com sensores capacitivos espalhados pela tubulação, sendo 8 sensores no total, que determinavam o *holdup* de líquido e as velocidades dos pistões. Eles observaram que pseudo-golfadas surgiam na região ascendente e que quando estavam na região descendente elas tendiam ou a estabilizar ou a virar um filme estratificado. Eles analisaram que as características das golfadas regulares mudaram na região ascendente, especialmente o comprimento do pistão, porém o padrão golfadas manteve-se quando passou pela região descendente. Foram observados também os efeitos provocados pela variação das velocidades superficiais e dos ângulos na parte ascendente nos resultados da frequência da célula e no comprimento dos pistões.

Zheng, Brill e Taitel (1994) foram os primeiros que utilizaram o método de seguimento de pistões (*slug tracking*) para modelar os fenômenos do escoamento em golfadas na presença de mudança de direção, dessa forma aprimorando o modelo apresentado por Barnea e Taitel (1993). Esse método trata-se de um modelo transiente que mapeia os parâmetros das células unitárias ao longo do tempo. Os autores tiveram como objetivo simular o movimento, crescimento, geração, coalescência e extinção dos pistões quando essas estruturas passam por uma mudança de direção. Para ter o fechamento do modelo, os pesquisadores adotaram certas simplificações como: a velocidade de cada filme de líquido dependendo somente da inclinação, a espessura do filme como sendo constante, o gás incompressível e, por fim, a velocidade dos pistões era constante e igual à velocidade da mistura.

Ainda sobre o estudo supracitado, os autores consideraram que há uma influência do comprimento do pistão sobre a velocidade da frente da bolha posterior e essa influência proporciona o mecanismo de coalescência. Eles desenvolveram uma relação para a taxa com que o líquido acumula na região do cotovelo a partir de um balanço de massa e da consideração de que, a totalidade do líquido acumulava-se na seção a montante do cotovelo. Dessa maneira, eles propuseram que um novo pistão é gerado assim que o comprimento do pistão supera um valor pré-estabelecido. Após essas considerações, as simulações foram realizadas e os resultados foram de acordo com os observados de maneira experimental, onde os comprimentos dos pistões diminuía na seção descendente podendo até extinguir-se e aumentavam na região ascendente.

Henau e Raithby (1995) fizeram um estudo experimental com uma tubulação constituída de quatro trechos para avaliar o escoamento bifásico. A tubulação possuía um primeiro trecho inclinado descendente, seguido de um ascendente, depois outro descendente e por fim outro ascendente, totalizando um comprimento de 3,84 m e com diâmetro de 0,0518 m. Os autores testaram dois casos, o primeiro em regime estacionário e o segundo transitório. Eles compararam os resultados dos experimentos com o modelo de dois fluidos. Para o caso transiente a comparação se mostrou satisfatória, porém para o caso estacionário observou-se discrepâncias entre os experimentos e o modelo.

Concomitantemente, Nydal e Banerjee (1995) apresentaram um modelo numérico considerando um pistão não-aerado, a fração de líquido no filme variável e o gás como sendo incompressível. Os autores utilizaram quatro equações para calcular os parâmetros ao longo do tempo: equações de quantidade de movimento para calcular velocidade no pistão e no filme, equações de conservação da massa para calcular a altura do filme e a pressão no interior da

bolha. Eles aplicaram o modelo desenvolvido para o caso de escoamento em *hilly terrain* e introduziram uma população de pistões na entrada que são distribuídos de maneira uniforme.

Taitel e Barnea (2000) fizeram uma extensão ao modelo de seguimento de pistões proposto por Taitel e Barnea (1998) a fim de descrever o escoamento em golfadas com mudança de direção. Eles adicionaram os mecanismos de geração e dissipação dos pistões que foram descritos por Zheng, Brill e Taitel (1994). Taitel e Barnea (2000) consideraram os efeitos da compressibilidade do gás, a variação da fração de vazio na região do filme e uma possível variação da velocidade de translação da bolha. Os autores comentam os comportamentos observados em cotovelos superiores, que são a drenagem do filme e a dissipação do pistão. Eles comentam também sobre os cotovelos inferiores, que provocam acúmulo de líquido e se não for suficiente para gerar um novo pistão, ele faz com que aumente o comprimento do pistão na região ascendente.

Taitel, Sarica e Brill (2000) investigaram as soluções das equações quantidade de movimento e da conservação de massa para um escoamento em golfadas descendente. Os autores simularam três diferentes situações: um duto inclinado e ascendente, seguido de um duto inclinado descendente e outro ascendente. A partir dessas simulações, eles observaram que o comprimento inicial dos pistões e das bolhas afetavam decisivamente no desenvolvimento de zonas estratificadas e na geração dos pistões. Ademais, as simulações evidenciaram que os pistões induzidos eram formados apenas quando haviam ângulos grandes com relação à horizontal. Essa última análise de certa maneira coincide com os resultados que foram vistos experimentalmente.

Al-Safran et al. (2000) realizaram um estudo com escoamento em golfadas com mudança de direção para uma mistura bifásica de ar e óleo mineral parafínico. A tubulação utilizada em tal estudo possuía 0,0508 m de diâmetro interno e um comprimento total de 42,7 m e configurada da seguinte forma: um trecho inicial horizontal, seguido por um ascendente e depois descendente, voltando a ser horizontal ao final. Os autores utilizaram 13 sensores capacitivos para medir e caracterizar o escoamento. A partir dos testes experimentais, Al-Safran et al. (2000) analisaram os fenômenos de dissipação das golfadas na região descendente, de crescimento dos pistões na parte ascendente e de geração dos pistões no cotovelo inferior da tubulação.

Sharma, Ihara e Manabe (2002) desenvolveram um simulador para misturas bifásicas de líquido-gás em uma tubulação. O algoritmo consiste no acoplamento do modelo unidimensional para hidrodinâmica das golfadas e uma metodologia de seguimento de interface. A solução desse modelo, segundo os autores, determina a localização e as

características de todas as células unitárias que existem na tubulação em um dado momento. Os autores compararam os dados das simulações com dados experimentais de tubulações horizontais e *hilly terrain*. Eles obtiveram uma boa concordância e, portanto, recomendam o uso do simulador apresentado para rastrear golfadas em tubulações com mudança de direção.

Al-Safran, Taitel e Brill (2004) desenvolveram um modelo de seguimento de pistões (*slug tracking*) para o escoamento em golfadas com mudança de direção. Esse modelo teve como objetivo prever as distribuições dos comprimentos dos pistões ao longo da tubulação. O modelo apresentado considera a fração de líquido no pistão e os efeitos de compressibilidade do gás. As simulações foram comparadas com dados experimentais para dois casos obtidos no *Tulsa University Fluid Flow Projects (TUFFP)*. O primeiro caso, o escoamento estratifica na seção descendente e o segundo, o escoamento em golfadas persiste nessa seção. A partir dessas comparações, os autores afirmaram que o modelo consegue prever de forma satisfatória os valores médios e desvios padrões para os dois casos. Porém, eles observaram discrepâncias entre os valores máximos do comprimento do pistão calculado e o medido.

Logo em seguida, Al-Safran et al. (2005) realizaram um estudo experimental a fim de entender os fenômenos vinculados ao escoamento em golfadas quando há mudança de direção, mais especificamente entender o mecanismo de inicialização da golfada em um cotovelo inferior. A mistura bifásica era constituída de um óleo mineral parafínico e ar e a configuração da tubulação era a mesma utilizada por Al-Safran et al. (2000). Os pesquisadores analisaram o comportamento do escoamento em golfadas para diferentes pares de velocidades superficiais e inclinações. Eles observaram que há situações em que a golfada se dissipa parcialmente, de forma total ou não se dissipa na região descendente. No cotovelo inferior, os autores identificaram que, dependendo da situação, pode haver geração ou crescimento dos pistões e que para o caso de geração há dois mecanismos: o crescimento e a coalescência das ondas. O mecanismo de crescimento é observado quando há acúmulo de líquido quando a bolha passa pelo cotovelo. Se o acúmulo de líquido alcançar a parte superior da tubulação, a bolha tenderá a se dividir e gerar um novo pistão.

Mandal et al. (2008) investigaram experimentalmente as características do escoamento bifásico no padrão golfadas com uma tubulação horizontal acoplada uma seção descendente seguida por uma ascendente e por fim retornando à direção horizontal. A tubulação possuía um comprimento total de 7,8 m e um diâmetro interno de 0,025 m. Os autores utilizaram sondas condutivas para caracterizar o escoamento a partir de técnicas de correlação cruzada. Eles também observaram um aumento no comprimento do pistão na parte ascendente e diminuição deles na região descendente. Outra análise dos autores foi que na região descendente há três

situações que podem ocorrer aos pistões: dissipação completa, parcial ou nenhuma dissipação. E essas situações dependem da velocidade superficial do gás e do número de Froude na entrada da seção descendente.

Conte et al. (2011) modificaram o modelo de segmento de pistões proposto por Rodrigues (2009) implementando uma leve mudança de direção, sendo então de um trecho horizontal para um inclinado ascendente. Portanto, o modelo tem como objetivo avaliar o líquido que tende a acumular na região do cotovelo, utilizando a análise de instabilidade de K-H. Essa instabilidade proporciona a verificação da geração de um novo pistão e, caso isso não aconteça, da transferência do líquido acumulado para o próximo pistão. Os autores simularam três casos, todos com um trecho horizontal seguido de um inclinado, que pode possuir três ângulos diferentes sendo  $+3^\circ$ ,  $+5^\circ$  e  $+7^\circ$  com relação a horizontal. Comparações com dados experimentais foram feitas e observou-se uma boa concordância entre eles.

Llantoy Parra (2013) desenvolveu um estudo experimental e numérico de escoamento bifásico ar e água no padrão golfadas com mudança de direção. A tubulação consistia em um duto de 0,026 m de diâmetro e de 5,8 m de trecho horizontal e 3,4 m de um trecho inclinado ascendente com  $+7^\circ$  com relação à horizontal. Utilizou-se sensores do tipo resistivo e transdutores de pressão para caracterizar o escoamento em golfadas, sendo 4 de cada, espalhados pela tubulação. O estudo numérico teve como foco a utilização do modelo de seguimento de pistões para prever o comportamento do escoamento ao passar por um cotovelo. O autor modificou o modelo proposto por Conte et al. (2011) adicionando uma alteração na geometria da bolha quando muda de direção, utilizando o modelo de bolha desenvolvido por Taitel e Barnea (1990). Por fim o autor comparou os dados experimentais com as simulações do modelo e obteve boa concordância entre eles, com erros em torno de 20%.

Conte (2014) desenvolveu um estudo numérico e experimental sobre o escoamento em golfadas. O autor propôs uma metodologia lagrangeana para monitorar e acompanhar o processo de iniciação do escoamento em golfadas em dutos horizontais e levemente inclinados. Para validar o método utilizado, o autor realizou um estudo experimental com uma tubulação que iniciava com uma região descendente e em seguida uma região horizontal. O autor utilizou sensores resistivos e transdutores de pressão para extrair as características do escoamento. Os resultados das simulações foram comparados com os dados experimentais e checkou-se a uma boa concordância entre eles, com erro médio de 30,7%.

Alves (2015) realizou um estudo experimental de um escoamento bifásico ar e água com mudança de direção no padrão golfadas. A configuração da tubulação constituía de um trecho horizontal de 5,76 m e um inclinado descendente de 3,38 m com ângulos de  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$  com

relação à horizontal e diâmetro de 0,026 m. O autor também utilizou 4 sensores resistivos para caracterizar o escoamento, juntamente com duas câmeras de alta velocidade para avaliação qualitativa e quantitativa das estruturas do escoamento. O autor identificou para quais condições o escoamento em golfadas estratifica dependendo da inclinação.

Alves (2015) ainda analisou que o mapa de fluxo apresentado por Taitel e Dukler (1976) não prevê bem os dados desse estudo, devido ao critério de entrada que o modelo utiliza. Observando essa discrepância, o autor propôs um método para a previsão das condições em que há estratificação com base no modelo de dissipação do escoamento em golfadas de Taitel, Sarica e Brill (2000) e dessa forma apresentou uma boa concordância. Observou-se também que há um aparecimento de uma cauda devido a aceleração do líquido no cotovelo e que esse efeito precede a estratificação do escoamento. E por fim, o autor não observou a drenagem do líquido que provoca o pistão de gás na região descendente, como exposto na Seção 2.3, na página 40, e exemplificado na Figura 14 (b), pois segundo o autor somente o trecho descendente não é suficiente para drenar o filme, visto que, possui um trecho horizontal antes do cotovelo.

Taitel et al. (2016) propuseram um modelo com uma abordagem simplificada para prever o comportamento transiente líquido-gás escoando em um terreno acidentado com múltiplos vales e picos. Os autores fizeram um estudo experimental com um sistema com três regiões acidentadas e que possuía 11,5 m de comprimento e um diâmetro de 0,044 m, além de transdutores de pressão que auxiliaram na obtenção dos parâmetros do escoamento. Os resultados apresentados tiveram uma concordância razoável com o modelo simplificado. Portanto, os autores concluíram que o modelo é viável para identificar a transição das interfaces de um escoamento estável para um transiente, como as golfadas em terrenos com vários acidentes.

Ersoy et al. (2017) realizaram uma investigação experimental de um escoamento trifásico (gás-óleo-água) em golfadas na presença de um *hilly terrain*. O estudo teve como objetivo entender o comportamento desse tipo de escoamento em um terreno com mudança de direção e também analisar a influência da fração de água nas características do escoamento em golfadas. A tubulação consistia de uma seção de testes com 68 m de comprimento com inclinações sendo de  $\pm 1^\circ$ ,  $\pm 2^\circ$  e  $\pm 5^\circ$ . Segundo os autores, os dados desse estudo contribuem para a melhoria do modelo de seguimento de pistões e podem auxiliar o desenvolvimento de novos modelos para construir e projetar equipamentos que trabalhem com escoamento trifásico nas linhas de petróleo por exemplo.

Almeida (2017) desenvolveu um simulador que acoplou o modelo de captura de golfadas (*Slug capturing*) e o modelo de seguimento de pistões (*Slug tracking*) e com isso possa

trabalhar com os dois modelos de forma simultânea. A proposta do autor é utilizar o modelo de captura de golfadas para a formação dos pistões e modelar os efeitos de mudança de direção. O modelo de seguimento dos pistões seria então utilizado para rastrear as células unitárias em trechos retos. Segundo o autor, essa nova metodologia reduziu o custo computacional em 50% com relação ao modelo de captura de golfadas unicamente. O autor comparou o modelo com os dados experimentais apresentados por Alves (2015) e mostrou uma boa concordância entre eles. Portanto, julgou-se o modelo híbrido hábil para prever a influência da mudança de direção, bem como os casos onde há estratificação do escoamento.

Yin et al. (2018) realizaram um estudo numérico e experimental para a iniciação e o desenvolvimento das golfadas para terrenos inclinados com uma baixa velocidade superficial de líquido. Os testes experimentais foram feitos em uma tubulação com três seções: a primeira horizontal, seguida por uma ascendente (+ 10°) e, por fim, uma descendente (- 10°). Os autores discutem que para a partir do escoamento estratificado quando o escoamento chega no cotovelo inferior, o líquido começa a acumular, gera-se ondas que bloqueiam inteiramente a seção transversal até que pistão é formado. Os autores também observaram que o *holdup* do líquido na região horizontal é afetado pelo líquido que retorna da região após o cotovelo e pelo acúmulo de líquido que gera a iniciação das golfadas.

## 2.4 COMENTÁRIOS FINAIS

Nesse capítulo, foi apresentada uma revisão das características e definições do escoamento em golfadas. Foram apontados os parâmetros mais utilizados para realizar a caracterização e quais os fenômenos que são observados quando existe uma mudança de direção. Apresentaram-se os estudos presentes na literatura sobre o escoamento bifásico líquido-gás em golfadas com presença de mudança de direção.

A partir dos trabalhos apresentados, além de outros encontrados na literatura, observou-se que há trabalhos desenvolvidos sobre esse tema, porém falta trabalhos com uma análise mais completa avaliando escoamento horizontal mudando para ascendente e descendente e com grandes comprimentos, como observado na Tabela 1. Na Tabela 1, pode-se perceber que apenas dois trabalhos (( ZHENG, BRILL e SHOHAM, 1992) e (GODHAVN, FARD e FUCHS, 2005)) possuem tubulações acima de 1000 D de comprimento e, dentre eles, apenas o de Zheng, Brill e Shoham (1992) estudou o escoamento ascendente e descendente mas sem utilizar a transição do horizontal para a região inclinada. Outra lacuna observada é a falta de trabalhos que utilizem instrumentações que extraem todos os parâmetros do escoamento de forma precisa.

Nesses termos, acredita-se que o presente trabalho contribuirá para a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos na mudança de direção a partir de um escoamento horizontal e gerando dados experimentais que auxiliem modelos e projetos de equipamentos.

**Tabela 1 - Comparação entre os trabalhos com mudança de direção.**

<b>Trabalho</b>	<b>L/D</b>	<b>Padrão</b>	<b>Direção*</b>	<b>Sentido**</b>
Vermeulen e Ryan (1971)	469	<i>Slug</i>	H+I	A+D
Schmidt, Brill e Beggs (1980)	900	<i>Slug</i>	H+V	-
Bendiksen (1984)	417	<i>Slug</i>	I	A
Kokal e Stanislav (1989a)	977	-	I	D
Zheng, Brill e Shoham (1992)	5509	<i>Slug</i>	I	A+D
Henau e Raithby (1995)	74	<i>Slug</i>	I	A+D
Roumazeilles et al. (1996)	390	<i>Slug</i>	I	D
Spindler e Hahne (1999)	235	-	I	A
Al-Safran et al. (2000)	840	<i>Slug</i>	H+I	A+D
Al-Safran et al. (2005)	840	<i>Slug</i>	H+I	A+D
Godhavn, Fard e Fuchs (2005)	3638	<i>Slug</i>	V+H	A
Mandal et al. (2008)	312	<i>Slug</i>	H+I	A+D
Llantoy Parra (2013)	353,9	<i>Slug</i>	H+I	A
Abdulkadir et al. (2015)	90	<i>Slug</i>	V+I	A
Alves (2015)	353,9	<i>Slug</i>	H+I	D
Taitel et al. (2016)	261,4	<i>Slug</i>	H+I	A+D
Conte et al. (2017)	337	Estratificado+ <i>Slug</i>	H+I	D
Ersoy et al. (2017)	685,4	<i>Slug</i>	H+I	A+D
Yin et al. (2018)	750	<i>Slug</i>	H+I	A+D
Presente trabalho	1384,6	<i>Slug</i>	H+I	A+D

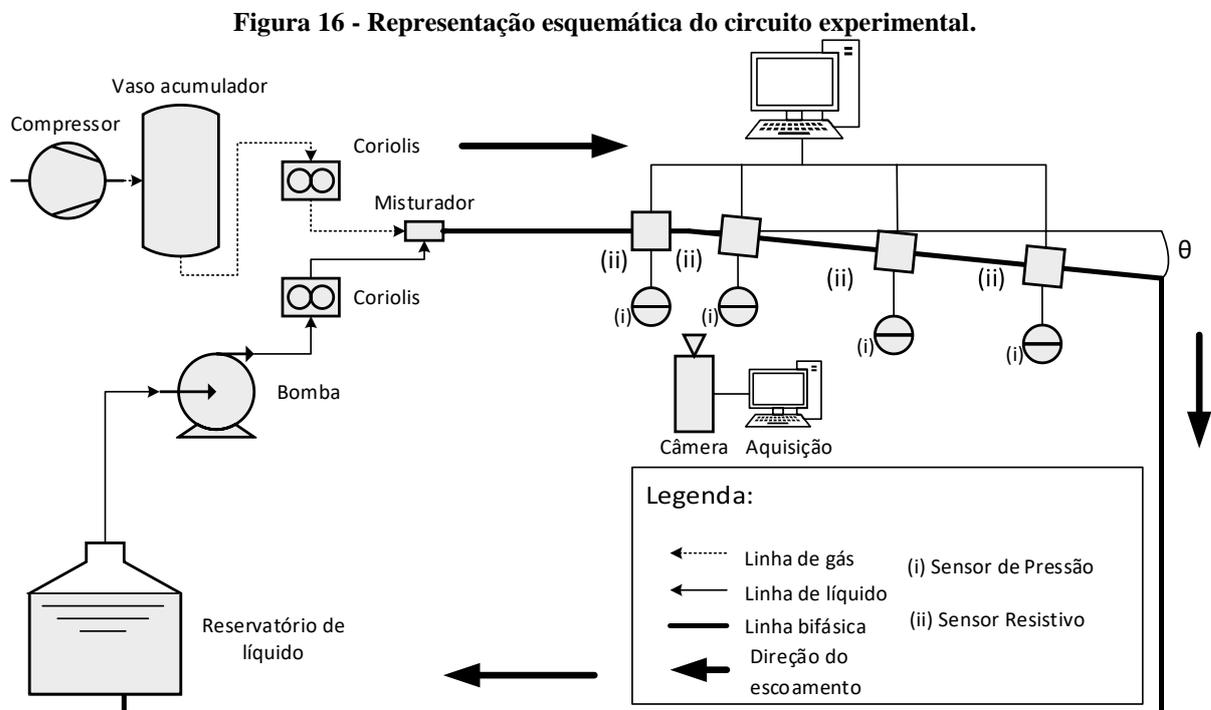
\*V=Vertical; H=Horizontal; I=Inclinado. \*\*A=Ascendente; D=Descendente.

### 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Nesse capítulo, será descrita a metodologia experimental que foi utilizada no desenvolvimento do trabalho. Primeiramente, apresenta-se o circuito bifásico experimental junto com os equipamentos que foram utilizados. Em seguida, mostram-se os procedimentos impostos para a medição, as técnicas utilizadas no processamento dados e as análises estatísticas empregadas. Por fim, é avaliada a repetitividade dos dados em relação às três baterias realizadas para a fração de vazio obtida pelo sensor resistivo e a velocidade da bolha calculada no processamento dos sinais.

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO CIRCUITO EXPERIMENTAL

A Figura 16 mostra o diagrama esquemático do circuito experimental do NUEM-UTFPR. O circuito possuía duas linhas de alimentação, sendo uma para o líquido e outra para o gás, e uma linha bifásica horizontal e inclinada contabilizando 35,6 m de comprimento, aproximadamente.



Fonte: autoria própria.

O líquido era bombeado de um reservatório com capacidade de 500 L por uma bomba centrífuga da marca *Thebe*® com vazão e altura máximas de 60 m<sup>3</sup>/h e 5,49x10<sup>5</sup> Pa (56 mca), respectivamente. O controle da vazão era acionado a partir de um inversor de frequência do

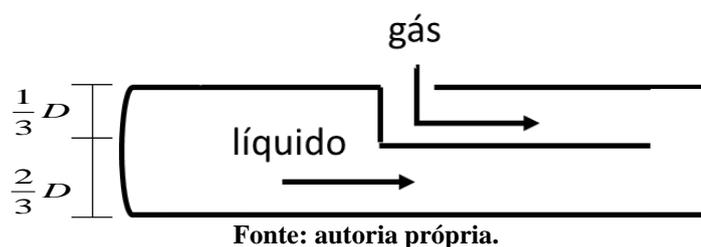
tipo WEG® de 7,5 kW (10 HP) que permitia o motor da bomba, da marca WEG® com 8,2 kW (11 HP) de potência, ajustar a vazão desejada.

Para as medições das vazões de líquido, foram utilizados dois medidores do tipo Coriolis da marca *Yokogawa*®, com vazões nominais de 8,9 kg/s e 0,83 kg/s. Os medidores Coriolis possuem uma compatibilidade com o protocolo *Foundation Fieldbus* e, portanto, possibilitam a comunicação com o sistema supervisório (descrito no Apêndice A). Após o medidor de vazão, o líquido é enviado ao misturador e, então, à seção de testes. As análises de incertezas inerentes aos instrumentos de medição e metodologias utilizados estão no Apêndice B

O gás era comprimido por um compressor da marca *Kaeser*® do tipo parafuso com potência de 18,5 kW que alcança uma pressão e vazão máximas de 15 bar e 2,5 m<sup>3</sup>/min, respectivamente. O gás era armazenado em um vaso acumulador para manter a vazão constante ao longo dos experimentos. Após o vaso acumulador, o gás passava por um medidor do tipo Coriolis da marca *Yokogawa*® cuja vazão nominal é de 0,013 kg/s, que media a vazão de gás antes de ir para o misturador e em seguida para a seção de testes. De forma semelhante ao Coriolis do líquido, o do gás também possuía compatibilidade com o protocolo *Foundation Fieldbus* e por isso permite se comunicar com o sistema supervisório.

A seção de testes era iniciada a partir de um misturador de placas paralelas distadas na proporção de 1/3 de cima para baixo na tubulação, esquematizado na Figura 17, que realizava a mistura bifásica. O gás entrava na parte superior do misturador e o líquido na inferior, gerando um escoamento estratificado no início que rapidamente se transformava em golfadas, por conta das instabilidades de K-H na interface líquido-gás.

**Figura 17 - Esboço do misturador de placas paralelas.**

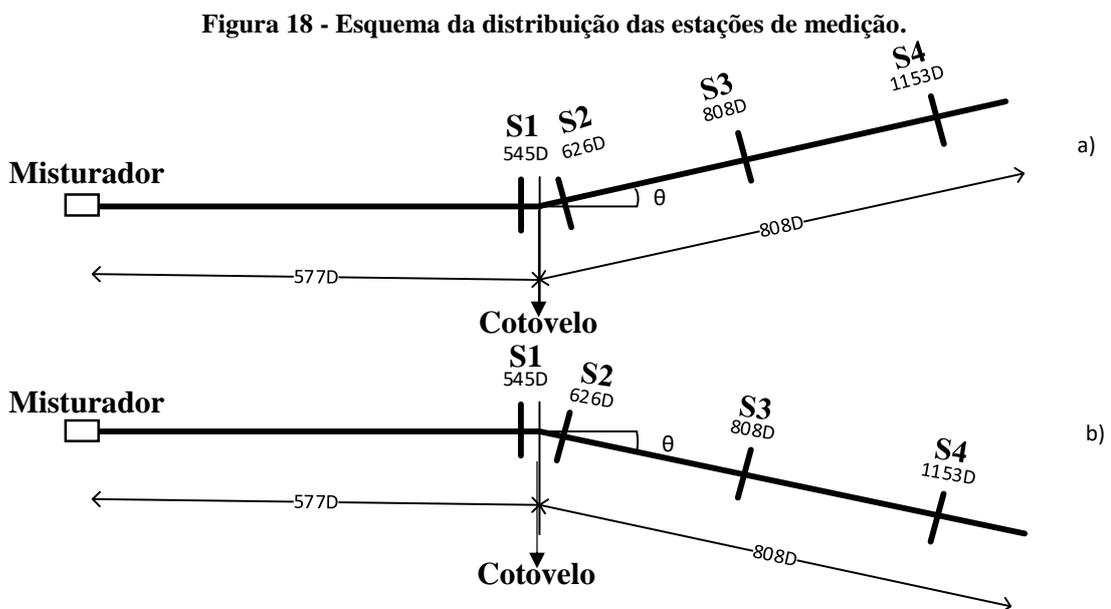


A seção de teste era caracterizada por uma tubulação de acrílico transparente com 0,026 m de diâmetro interno e 35,6 m de comprimento, aproximadamente. Houveram uma configuração de tubulação completamente horizontal e duas configurações de mudança de direção, uma ascendente e outra descendente. As duas configurações inclinadas tiveram 15 m (577 D) de comprimento horizontal e 21 m (808 D) de comprimento da região inclinada, tanto para o ascendente como descendente com ângulos de  $\pm 3^\circ$ ,  $\pm 5^\circ$  e  $\pm 7^\circ$  com relação à horizontal.

Salvo para a inclinação de  $-7^\circ$ , onde a região inclinada não podia ficar até o fim por motivos de restrição espacial, fazendo com que houvesse um trecho horizontal no fim.

O monitoramento da seção de testes foi realizado por estações de medição ao longo da tubulação. A Figura 18 (a) mostra a configuração ascendente da seção de teste e a Figura 18 (b) mostra a descendente. A Figura 18 mostra as quatro estações de medição, que distam 545 D, 626 D, 808 D e 1153 D do misturador para cada inclinação. Onde a estação S1 (545 D) encontrava-se na região horizontal e as estações S2, S3 e S4 (626 D, 808 D e 1153 D) encontravam-se na região inclinada. Porém, devido a limitação espacial da bancada, a estação S4 (1153 D) para o caso da inclinação  $-7^\circ$  voltava para a direção horizontal. O final da tubulação distava em torno de 35,6 m (1370 D) e possuía um hidrociclone para realizar a separação das fases.

Cada estação de medição era composta de um sensor do tipo resistivo e um sensor de pressão. O sensor resistivo foi utilizado para extrair os parâmetros mais importantes do escoamento e será discutido na Seção 3.2 a seguir. O sensor de pressão media a pressão localmente e esse valor era utilizado para corrigir o cálculo da velocidade superficial do gás, como discutido na Subseção 2.2.1, na página 24, além de avaliar a queda de pressão que ocorre entre os trechos. Os sensores de pressão são da marca *Rosemount*® dos tipos 3051 e 2051, sendo 4 manométricos e um para medir a pressão atmosférica como referência.

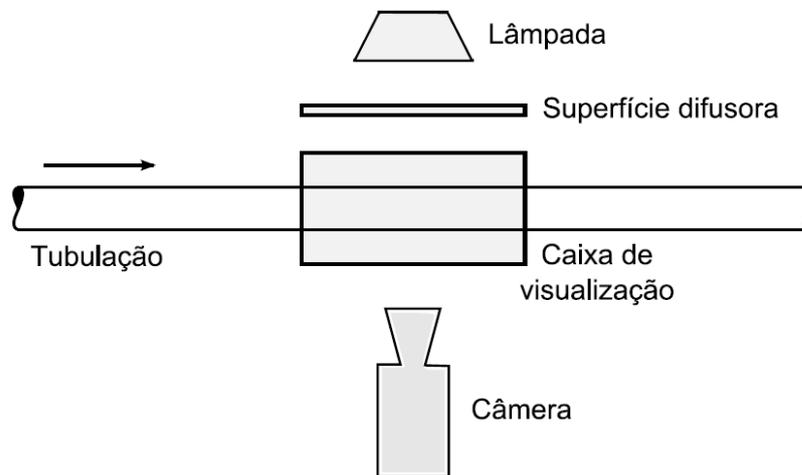


Fonte: autoria própria.

A câmera de alta taxa de aquisição foi posicionada a 15 m (577 D), ou seja, exatamente no cotovelo nas duas configurações de inclinação, bem como na região inclinada para que se tivesse uma melhor perspectiva dos fenômenos que ocorriam nessa região.

Para auxiliar a filmagem, foi disposta uma caixa retangular de acrílico transparente preenchida com água, envolvendo o tubo na região da filmagem. A caixa de visualização serviu para diminuir as distorções das imagens e os efeitos de aquecimento provocados pela iluminação da lâmpada posicionada conforme mostra a Figura 19. Para que houvesse uma iluminação uniforme, colocou-se uma superfície difusora entre a lâmpada e a caixa de visualização.

**Figura 19 - Esquema da seção de filmagem.**



**Fonte: Alves (2015).**

### 3.2 INSTRUMENTAÇÃO PARA DETECÇÃO DE FASES

A extração dos parâmetros mais importantes do escoamento em golfadas foi realizada através de pares de sensores resistivos instalados ao longo da tubulação e com o auxílio de sensores de pressão. Além disso, com uma câmera de alta taxa de aquisição de imagens, localizada nas regiões do cotovelo e inclinada, pôde-se comparar qualitativamente os dados obtidos pelos sensores, bem como analisar fenômenos que ocorriam exatamente no cotovelo. Essas técnicas serão descritas com mais detalhes nas subseções a seguir.

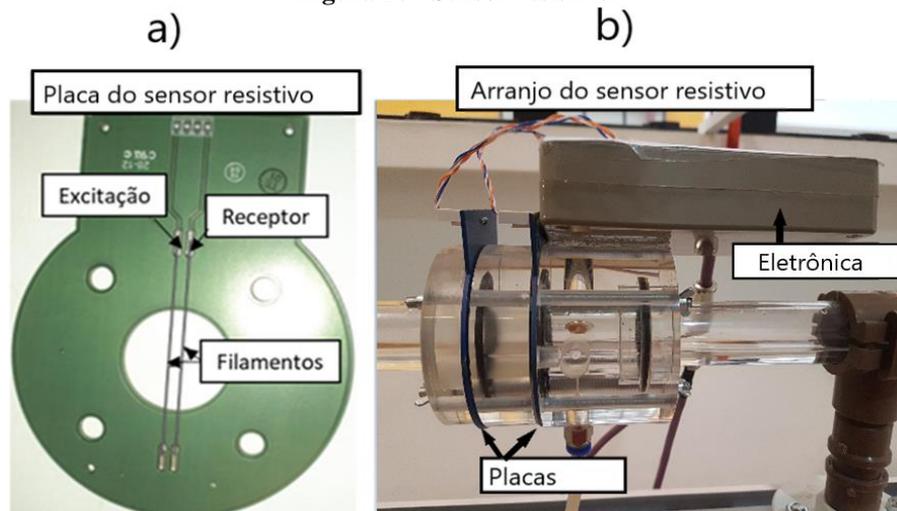
#### 3.2.1 Sensores Resistivos

Os sensores resistivos possuem como função principal detectar as fases presentes no escoamento. Eles foram desenvolvidos no NUEM por Machado, Hildebrando e

Lipinski (2013). A medição do sensor tem base no princípio de que, as fases da mistura possuem diferentes condutividades elétricas, portanto, para o caso do escoamento bifásico, a resistência elétrica varia de acordo com as distribuições das fases. Utilizando esse princípio, torna-se possível estimar a quantidade de cada fase e a altura do filme de líquido ( $h_L$ ) no caso de um escoamento estratificado. Para extrair os outros parâmetros como a velocidade da bolha, comprimentos dos pistões e das bolhas e frequência foi instalado um sensor gêmeo com uma distância conhecida entre os dois sensores.

O sensor resistivo é constituído por dois pares de filamentos de aço inoxidável de 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro, como pode ser visto na Figura 20 (a). O sensor é composto também por duas placas de circuito impresso espaçadas entre si e unidas por dois flanges como pode ser observado na Figura 20 (b), configurando assim os pares de sensores. Os flanges são de acrílico e as placas de circuito impressos (PCI) são feitas de fibra de vidro com impressão de cobre.

**Figura 20 - Sensor resistivo.**



Fonte: autoria própria.

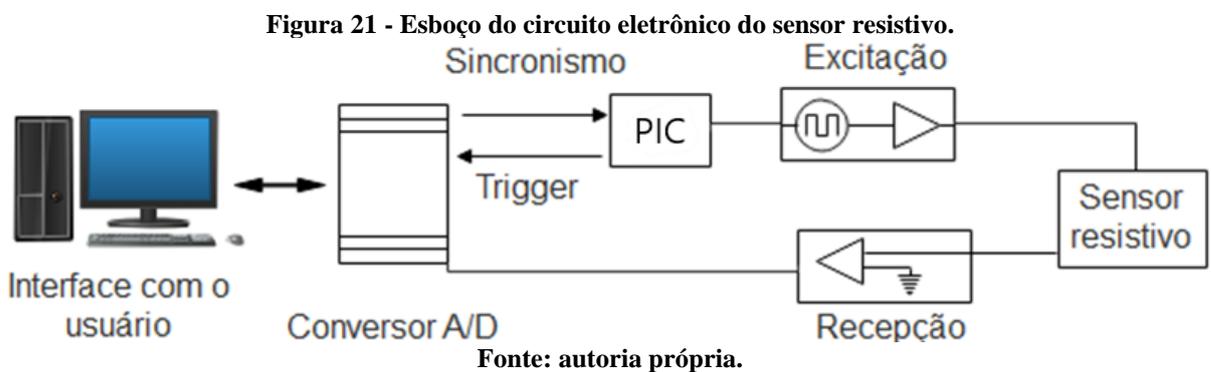
Cada placa contém um par de sensores, e em cada par, um dos filamentos funciona como um eletrodo de excitação e o outro como eletrodo de recepção, com 3 mm de espaçamento entre eles. O eletrodo de excitação (emissor) recebe um sinal quadrado de 5 Vpp com uma frequência de 1,75 kHz e envia em seguida pelo fluido que está escoando para o eletrodo receptor. A tensão que é lida pelo receptor será máxima quando o tubo estiver cheio de água e zero na presença de ar. Observou-se que essa variação é linear e, portanto, dessa forma é que se encontra a altura de líquido comparando o sinal obtido com o sinal da calibração.

Isto posto, a partir dessa observação propôs-se então a Equação (42) que exprime a relação utilizada para obter-se a altura de líquido a partir de valores de referência:

$$h_L = \frac{V_i - V_V}{V_C - V_V} \quad (42)$$

onde  $V_V$ ,  $V_C$ ,  $V_i$  são respectivamente a tensão na tubulação com o tubo vazio, cheio e em um determinado instante de tempo  $i$ . Desta forma, a partir de um posterior processamento obtêm-se uma série temporal da altura de líquido adimensional para cada par de velocidade superficial de gás e de líquido.

Para funcionarem, os sensores resistivos precisam de um sistema composto por: um circuito eletrônico (PIC) que tem como função gerar os sinais de excitação e capturar os sinais de resposta; uma placa de aquisição de dados que converte os sinais analógicos em digitais e que possibilita a interação dos dados com o computador e a interface utilizada pelo usuário é feita na plataforma *LabVIEW*, que permite o controle dos parâmetros de entrada. Um esboço desse sistema é mostrado na Figura 21.



### 3.2.2 Câmera de Alta Taxa de Aquisição de Imagens

A aquisição das imagens foi realizada utilizando uma câmera de alta taxa de aquisição, cujo modelo é *IDT X-Series MotionPro X3*. Essa câmera possui uma taxa máxima de aquisição de 1040 imagens por segundo e com uma resolução de 1280x1024. A câmera possui um *software* próprio que permite o ajuste dos parâmetros para a filmagem, como por exemplo a taxa de aquisição, a região de filmagem efetiva, o tempo de exposição de luz e o número de quadros (*frames*) adquiridos. Em contrapartida, o foco da lente é ajustado manualmente.

A câmera foi posicionada tanto na região do cotovelo quanto na região de mudança de direção para que fosse possível observar os fenômenos que ocorriam nessas regiões.

### 3.3 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

Após a definição da grade de testes em função das velocidades superficiais das fases que será apresentada na Seção 4.1, iniciava-se o procedimento das medições experimentais posicionando a câmera na região de interesse. Ajustava-se a iluminação e era inicializado o programa na câmera, ajustando o foco e os outros parâmetros. Foram estabelecidas as taxas de aquisição de 125 e 250 imagens por segundo e a escolha entre as duas dependia das vazões das fases.

O motor e o inversor da bomba eram ligados. Posteriormente, ligavam-se os sensores de pressão e os medidores de vazão de líquido e de gás. Acionava-se o sistema supervisor (Apêndice A) que possibilitava a verificação de todo o funcionamento e a comunicação dos sensores instalados no circuito experimental. Iniciava-se o programa dos sensores resistivos para iniciar as calibrações.

Primeiramente, o escoamento monofásico de líquido era passado pela tubulação e adquiria-se o sinal de calibração requerido pelo sensor resistivo. As calibrações dos sensores resistivos eram repetidas ao longo da medição, pois observava-se que a condutividade do líquido variava com a temperatura, modificando assim a resposta dos sinais. Portanto, a cada 0,5°C a mais de temperatura que o medidor Coriolis de líquido media, retornava o escoamento monofásico para novas calibrações.

Após a etapa de calibração, as vazões de líquido e gás eram ajustadas de forma a obter as velocidades superficiais do ponto experimental requerido. A vazão de líquido necessária era informada no sistema supervisor e o inversor de frequência, automaticamente, ajustava a rotação da bomba para alcançar a vazão solicitada pelo usuário. A vazão do gás era controlada de forma manual através de uma válvula do tipo agulha e era monitorada ao longo da seção de teste com base na correção da pressão, descrita na Subseção 2.2.1 e expressa na Equação (8).

A aquisição dos dados era inicializada assim que as vazões estivessem estabilizadas. Após essa estabilização, iniciava-se a gravação no sistema supervisor, no programa dos sensores resistivos e também a gravação da câmera. O tempo de gravação variava de 100 à 480 s e foram definidos com base nas vazões das fases. A taxa de aquisição dos sensores resistivos foi de 450 Hz em todos os pontos.

Logo após terminar o tempo de medição de cada ponto, os dados eram transferidos da memória interna da câmera para o disco rígido do computador. Em seguida, as vazões eram reajustadas para o próximo ponto experimental.

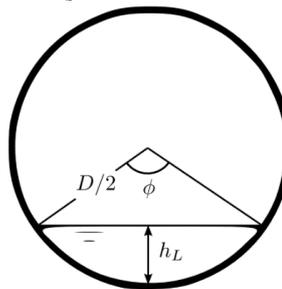
Ao todo foram realizadas três baterias de medições para cada configuração. Ao fim da terceira bateria, ajustava-se a inclinação da tubulação com o auxílio de um medidor de inclinações digital *GIM 60 L Professional* da *Bosch®*. Realizava-se todo o procedimento experimental descrito, para as três baterias e por fim reajustava-se a próxima inclinação.

### 3.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Um algoritmo desenvolvido em *Matlab®* no NUEM-UTFPR por Vicêncio (2013) foi utilizado para realizar o processamento dos dados obtidos pelo sensor resistivo. O algoritmo desenvolvido tem como função principal converter a altura de líquido ( $h_L$ ) em fração de gás ( $R_G$ ). Além disso, o algoritmo determina os valores da frequência da célula unitária, velocidade da bolha, comprimentos das bolhas e dos pistões de líquido.

Os sensores resistivos geravam séries temporais da altura de líquido adimensional ( $h_L/D$ ). Então para realizar a conversão de altura de líquido em fração de gás, considerava-se que a interface entre as fases era plana e que a fração de vazio era função do ângulo de contato na interface ( $\phi$ ), como o definido por Dukler e Hubbard (1975) e esquematizado na Figura 22. O ângulo de contato foi definido como função da altura de líquido adimensional por meio de relações geométricas, expresso na Equação (43):

**Figura 22 - Seção transversal da tubulação.**



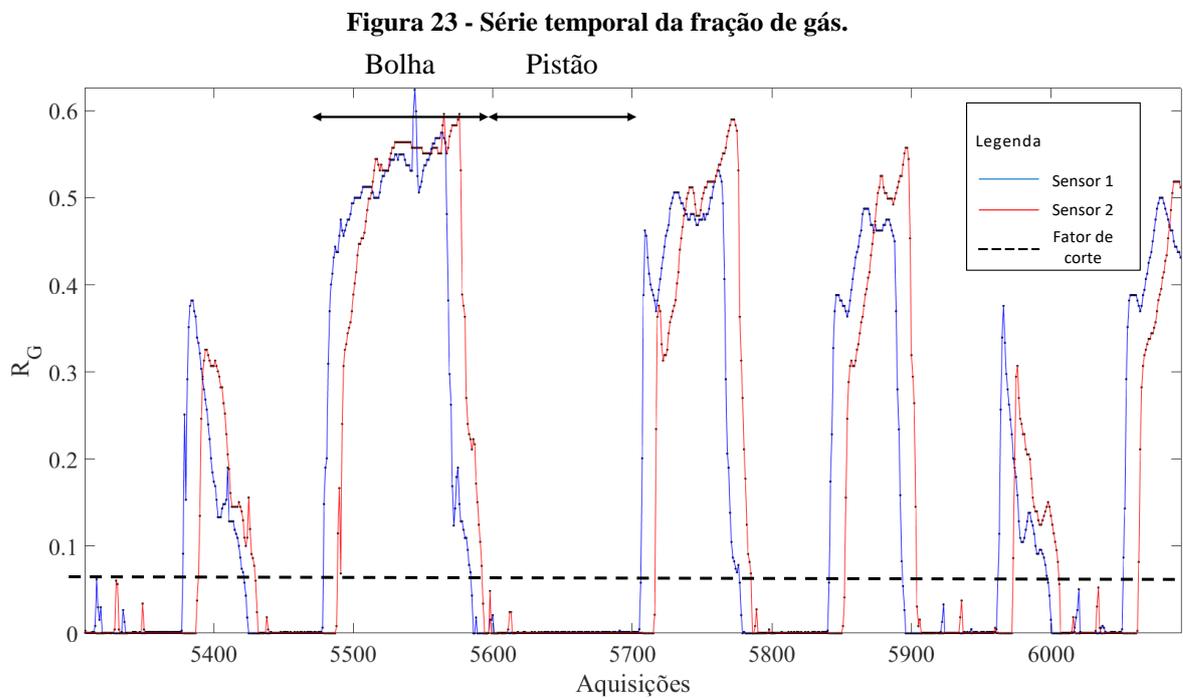
**Fonte: adaptado de Llantoy Parra (2013).**

$$\phi = 2 \arccos \left( 1 - \frac{2h_L}{D} \right) \quad (43)$$

Tendo sido obtido o ângulo de contato, torna-se possível calcular a fração de gás conforme foi sugerido por Taitel e Barnea (1990) e descrito na Equação (38):

$$R_G = 1 - \frac{1}{\pi} \left[ \frac{\phi}{2} - \left( 1 - \frac{2h_L}{D} \right) \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{2h_L}{D} \right)^2} \right] \quad (44)$$

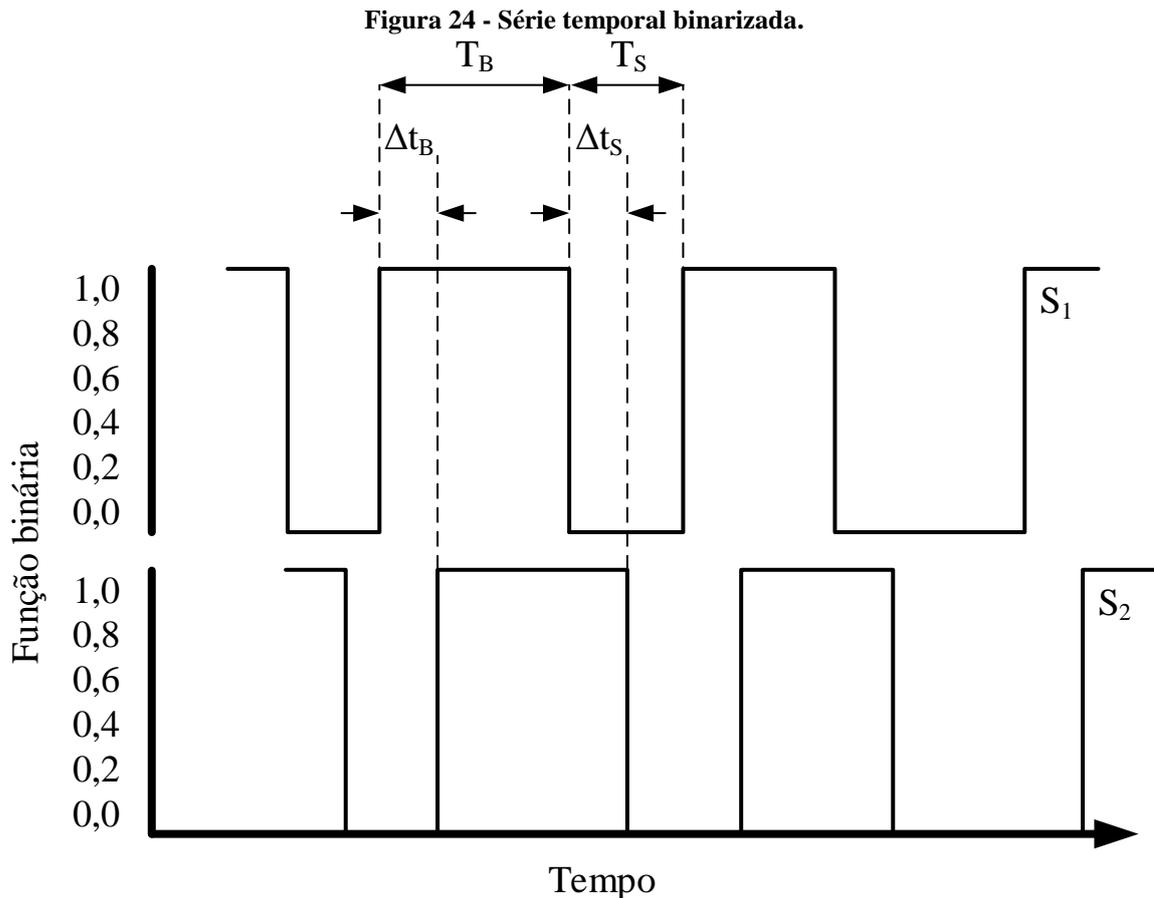
A Figura 23 mostra o exemplo de uma série temporal obtida pelos sensores gêmeos durante o escoamento em golfadas. O processamento começa com a definição do Fator de Corte ( $FC$ ) que destaca principalmente as regiões da bolha e do pistão, onde todos os pontos acima da linha do fator de corte são bolhas e os abaixo são pistões. A partir dessa consideração, utiliza-se uma função binária, semelhante a uma função indicadora de fase, como foi proposta por Bertola (2003) e demonstrada na Equação (45).



$$u(R_G, t) = \begin{cases} 0 & ; \text{ se } R_G < FC \\ 1 & ; \text{ se } R_G > FC \end{cases} \quad (45)$$

Então, utilizando a Equação (45), os valores 0 representaram os pistões e os valores 1, as bolhas. O  $FC$  dependia da quantidade de gás que havia na célula unitária, ou seja, era escolhido entre o máximo e o mínimo do sinal da fração de gás. Portanto, o  $FC$  era determinado de forma independente para cada série temporal, pois dependia da aeração e das velocidades superficiais das fases.

O sinal então era binarizado para cada par de sensores resistivos, como mostrado na Figura 24. Onde os valores de  $T_B$  e  $T_S$  representam os períodos (em segundos) de passagem da bolha e do pistão, respectivamente, por um dado sensor. Os períodos são calculados com base na razão entre o número de dados adquiridos na região e a taxa de aquisição. Dessa forma, a frequência da célula unitária, definida na Equação (20), na página 32, pôde ser calculada.



Fonte: Alves (2015).

Na Figura 24, podem ser observadas as defasagens entre a detecção da bolha ( $\Delta t_B$ ) e do pistão ( $\Delta t_S$ ) entre o sensor 1 e o sensor 2. A partir dessa diferença de tempo entre a bolha em cada par de sensor e a distância conhecida entre os pares ( $d_S$ ) pôde-se encontrar a velocidade de translação da bolha conforme a Equação (46).

$$V_B = \frac{d_S}{\Delta t_B} \quad (46)$$

A partir da velocidade de translação da bolha, os períodos de passagem das estruturas e a hipótese de que a célula unitária escoava com a velocidade da frente da bolha, apresentado por

Fabre (2003), puderam-se encontrar os comprimentos da bolha ( $L_B$ ) e do pistão ( $L_S$ ) rearranjando as Equações (21) e (22), como podem ser vistos nas Equações (47) e (48):

$$L_B = V_B T_B \quad (47)$$

$$L_S = V_B T_S \quad (48)$$

Tendo o conhecimento das regiões de cada estrutura do escoamento, então puderam ser definidas as frações de gás na bolha ( $R_{GB}$ ) e no pistão ( $R_{GS}$ ) como sendo a média dos valores dos sinais em suas respectivas regiões, que pode ser representado nas Equações (49) e (50):

$$R_{GB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{G_i}, \quad (49)$$

$$R_{GS} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_{G_i}, \quad (50)$$

onde  $n$  é o número de aquisições durante a passagem da bolha e  $m$  o número de aquisições durante a passagem do pistão.

### 3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Nessa seção, serão apresentadas as análises estatísticas que foram utilizadas para avaliar o comportamento do escoamento a partir dos dados obtidos nos experimentos. Além das médias, desvios e as distribuições dos dados, foram analisadas as funções densidade de probabilidade (*PDFs*) e os diagramas de caixa (*Box plot*).

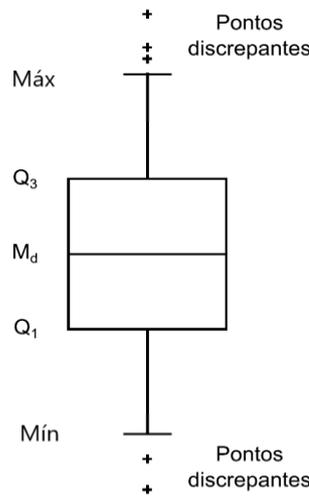
#### 3.6.1 Diagrama de Caixa

Os diagramas de caixa têm por finalidade, de forma simplificada, representar a distribuição dos dados com base na mediana ( $Md$ ), primeiro ( $Q_1$ ) e terceiro quartis ( $Q_3$ ), dos valores máximos e mínimos e os discrepantes (*outliers*).

O diagrama de caixa que foi introduzido por Tukey (1977) e é exemplificado na Figura 25, baseia-se na construção de uma caixa com a base sendo o primeiro quartil e o topo o terceiro quartil e uma marcação no centro, que representa a mediana. Portanto, esta caixa representa os 50% dos valores centrais observados. Os valores máximos e mínimos são conectados a caixa através de segmentos de reta verticais, chamados de *whisker*. Os pontos discrepantes são demarcados individualmente e definidos, ainda segundo Tukey (1977), como pontos fora do intervalo observado na Equação (51).

$$\left[ Q_3 - 1,5(Q_3 - Q_1); Q_3 + 1,5(Q_3 - Q_1) \right] \quad (51)$$

**Figura 25 - Exemplo de diagrama de caixa.**



**Fonte: adaptado de Alves (2015).**

Os pontos discrepantes não serão apresentados no diagrama de caixa pois, não há conformidade entre vários autores (Schwertman, Owens e Adnan (2004), Schwertman e Silva (2007) e Hubert e Vandervieren (2008)) com relação aos intervalos e aos critérios para identificá-los. Ademais, os pontos discrepantes podem não ser considerados como “reais”, segundo Hoaglin, Iglewicz e Tukey (1986), uma vez que esses pontos diferem do restante do conjunto.

### 3.6.2 Histogramas, *PDFs* e Distribuições

Os parâmetros característicos para cada célula unitária, extraídos do processamento, não são constantes ao longo do tempo e observou-se que variam em uma determinada faixa. Com o

intuito de caracterizar estas faixas, foram utilizados histogramas que representarão a frequência de ocorrência dentro das categorias dos dados.

As funções densidade de probabilidade (*PDFs*) servem para demonstrar o comportamento probabilístico de uma variável, em outras palavras, elas exprimem a probabilidade de que a variável em questão assuma possíveis valores em uma dada faixa. Portanto, para cada parâmetro do escoamento em golfadas, pode ser utilizada uma função  $k(t)$  e a *PDF* como uma função  $p(k)$ . Para que isso seja considerado, as seguintes propriedades devem ser satisfeitas:

$$k(t) \geq 0 \quad (52)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} k(t) dt = 1 \quad (53)$$

$$p(k) = Pr(a \leq k(t) \leq b) = \int_a^b k(t) dt \quad (54)$$

onde  $Pr(a \leq k(t) \leq b)$  significa a probabilidade da função aleatória  $k(t)$  assumir valores no intervalo entre  $a$  e  $b$ .

Outros dois parâmetros importantes para as análises estatísticas são a média e o desvio padrão. A média ( $M$ ) dos dados agrupados da função  $k(t)$  é definida na Equação (55):

$$M_k = \sum_{i=1}^n k_i p(k_i) \quad (55)$$

onde  $n$  é o número do intervalo de classes utilizado e  $p(k_i)$  é a probabilidade de ocorrência de  $k_i$ . Por sua vez, o desvio padrão ( $\Omega$ ) quantifica a dispersão dos dados, sendo definido na Equação (56):

$$\Omega = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (k_i - M_k)^2} \quad (56)$$

Analisando a literatura, observou-se que alguns autores identificaram que as *PDFs* dos parâmetros característicos do escoamento em golfadas podem ser aproximadas por distribuições conhecidas no estudo estatístico. As distribuições mais encontradas nas análises desses parâmetros são a distribuição normal, log-normal e Weibull.

A distribuição normal ou também conhecida como gaussiana de um dado parâmetro  $k$  é definida como sendo uma função  $p(k)$  expressa na Equação (57). Com relação ao escoamento em golfadas, Nydal, Pintus e Andreussi (1992) indicaram que a velocidade da bolha se aproxima de uma distribuição normal

$$p_{normal}(k) = \frac{1}{\Omega_k \sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \frac{(k_i - M_k)^2}{2\Omega_k^2} \right] \quad (57)$$

Nydal, Pintus e Andreussi (1992) apontaram que a fração de vazio no pistão aproxima-se de uma log-normal e Brill et al. (1981) e Sæther et al. (1990) observaram que o comprimento da bolha também se assemelha com esse tipo de distribuição. Portanto, afim de obter-se uma distribuição log-normal, troca-se a variável  $k$  da Equação (57) por  $y = \ln(k)$ , e dessa maneira encontra-se a distribuição log-normal segundo a Equação (58):

$$p_{\log-normal}(y) = \frac{1}{k_i \Omega_y \sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \frac{(y_i - M_y)^2}{2\Omega_y^2} \right] \quad (58)$$

Vicêncio (2013) observou um comportamento log-normal para as distribuições da frequência de passagem da célula unitária e para o comprimento do pistão. O autor observou também que para a fração de vazio na bolha, o comportamento da distribuição assemelha-se à distribuição de Weibull. Segundo Montgomery e Runger (2010), este tipo de distribuição possui uma maior flexibilidade em relação ao ajuste dos modelos estatísticos quando comparada com a distribuição normal. A distribuição de Weibull pode ser encontrada a partir da Equação (59):

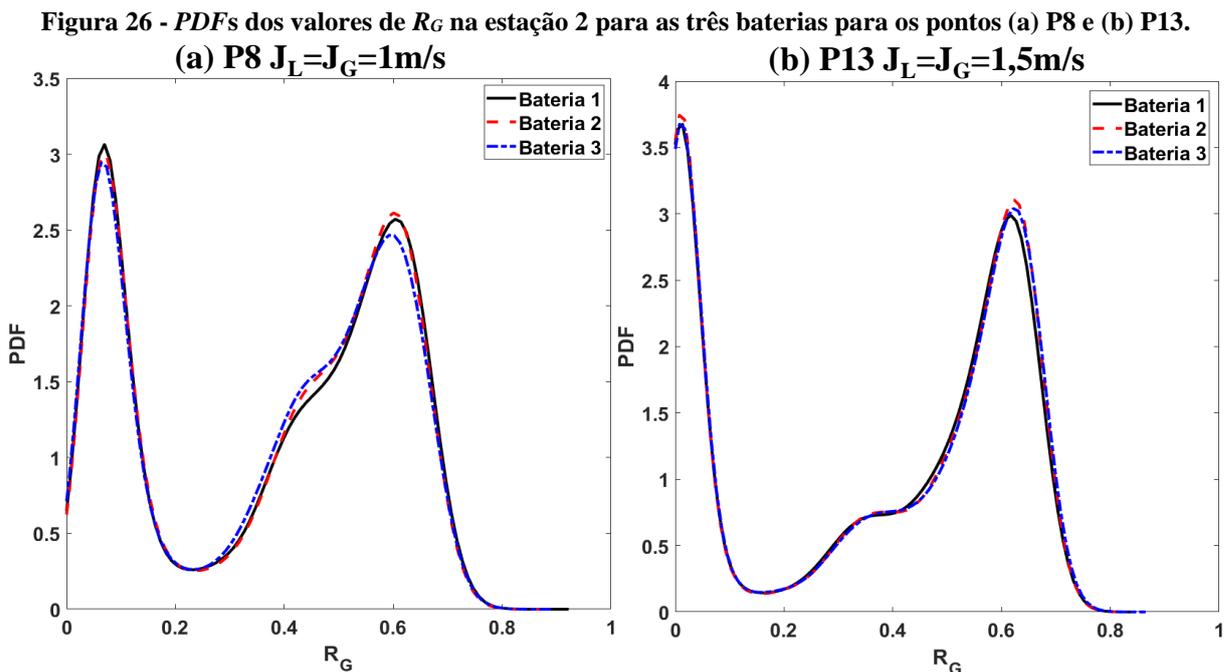
$$p_{Weibull}(k) = \frac{\omega}{\delta} \left( \frac{k}{\delta} \right)^{\omega-1} \exp \left[ - \left( \frac{k}{\delta} \right)^\omega \right] \quad (59)$$

onde  $\delta$  e  $\omega$  são conhecidos como parâmetros de forma e de escala de distribuição, respectivamente.

### 3.7 REPETITIVIDADE DAS MEDIÇÕES

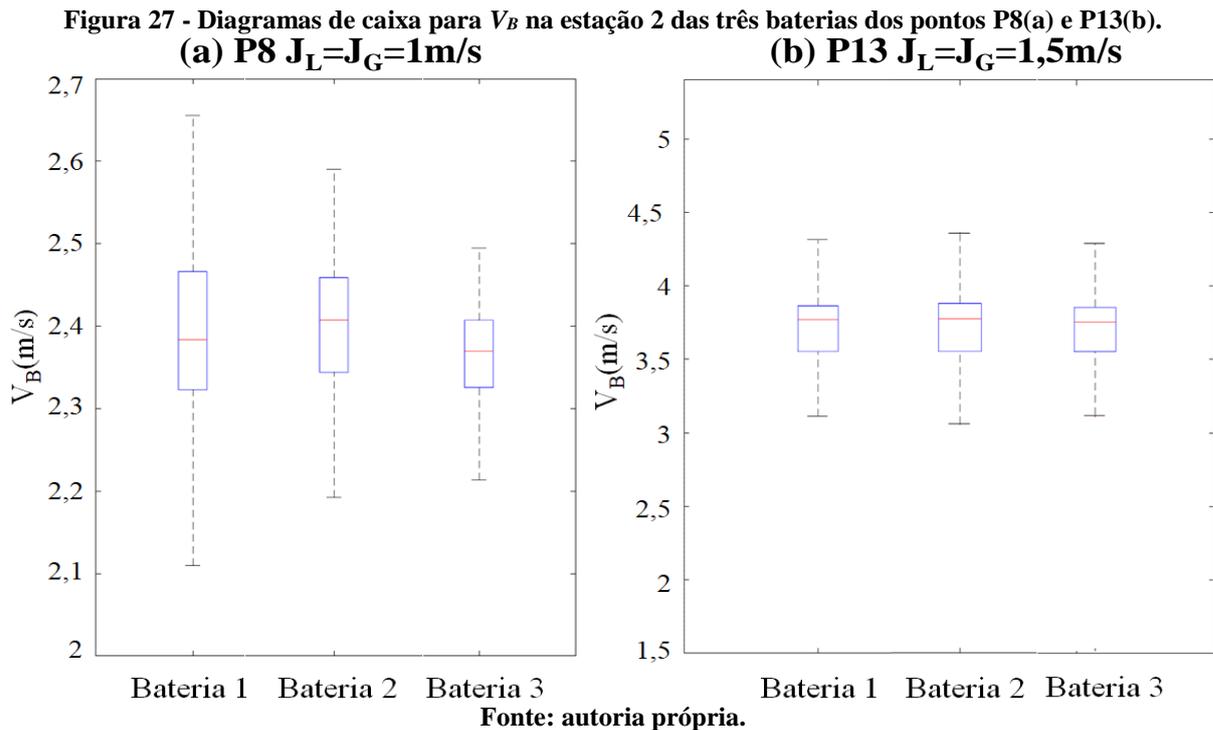
Os pontos experimentais foram realizados três vezes, configurando 3 baterias de testes, em dias e horários diferentes para que fosse possível observar a repetitividade dos dados. As 3 baterias foram comparadas entre si utilizando os sinais de fração de vazio obtidos pelos sensores resistivos e os parâmetros característicos extraídos do processamento desses sinais.

As Figuras 26 (a) e (b) mostram as *PDFs* de fração de vazio da estação S2 (626 D) calculadas a partir do processamento dos sinais de altura de líquido dos sensores resistivos, conforme a Equação (44), para cada bateria para os pontos P8 ( $J_G=J_L=1\text{m/s}$ ) e P13 ( $J_G=J_L=1,5\text{m/s}$ ), respectivamente.



Analisando a Figura 26, primeiro ressalta-se o comportamento bimodal da *PDF* da fração de vazio, que é característico do escoamento em golfadas. Isso ocorre, pois, o pico de valores menores (esquerda) refere-se as bolhas dispersas presentes no pistão e o pico de valores maiores (direita) refere-se a bolha alongada. Além disso observa-se que os valores de fração de vazio praticamente não variam para um mesmo ponto em todas as baterias. Esse mesmo comportamento foi observado para os demais pontos e estações.

Portanto, a partir da Figura 27, encontrou-se um erro médio de 0,21% e um erro máximo de 0,53% entre as medianas das Baterias 2 e 3 em relação a Bateria 1 para o ponto P8 e 0,22% e 0,56% para o P13. Os demais pontos experimentais possuem a mesma ordem de grandeza para esses erros, ou seja, o processamento dos sinais resulta valores que são consistentes entre as baterias.



As velocidades da bolha alongada da estação S2 dos pontos P8 e P13 foram plotadas em um diagrama de caixa nas Figuras 27 (a) e (b), respectivamente, para as três baterias com a objetivo de avaliar a repetitividade. A velocidade da bolha é um parâmetro que deve ter uma boa repetitividade pois é utilizado para o cálculo de outros parâmetros, como os comprimentos da bolha e do pistão, além de ser bastante utilizado para a caracterização do próprio escoamento.

Nestes termos, observando a boa repetitividade entre as baterias com base nas análises apresentadas, pode-se afirmar que resultados significativos de qualquer bateria podem ser utilizados para caracterizar o escoamento em golfadas no presente trabalho. Nesses termos, as próximas discussões e análises a serem analisadas a seguir, serão com base apenas em uma das baterias.

### 3.8 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentados a descrição da bancada experimental e os arranjos das seções de teste e medição. Mostrou-se os instrumentos de medição que foram utilizados, seus princípios de funcionamento e os arranjos físicos.

Apresentou-se, com detalhes, as etapas do procedimento experimental e os processamentos que foram utilizados para a obtenção das séries de dados dos principais parâmetros do escoamento em golfadas. Em seguida, foram apresentadas as análises estatísticas que foram realizadas para caracterizar essas séries temporais, portanto, caracterizar o escoamento. Por fim, foram mostradas as análises de repetitividade de medição das três baterias, as quais mostraram boa concordância e por fim escolheu-se apenas uma bateria a ser mostradas nos resultados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo, serão apresentados os resultados dos experimentos realizados na bancada experimental do NUEM-UTFPR. A bancada consistiu em três configurações de tubulação com diâmetro de 0,026 m. A primeira inteiramente horizontal com 35,6 m de comprimento, aproximadamente, servindo de referência para os testes com mudança de direção. As outras duas configurações possuem 15 m de tubulação horizontal com os outros 21 m inclinados, variando-se os ângulos de inclinação em  $\pm 3^\circ$ ,  $\pm 5^\circ$  e  $\pm 7^\circ$  com relação à horizontal. As estações de medição foram dispostas conforme o indicado na Seção 3.1. Porém, para o caso da inclinação -  $7^\circ$ , por motivo de limitação espacial da bancada, a última estação de medição voltou a ficar na direção horizontal.

Primeiro, será mostrada a grade de testes que foi utilizada no trabalho. Em seguida, serão apresentados os resultados dos principais parâmetros do escoamento em golfadas, de forma geral, em comparação com correlações e distribuições para o caso horizontal. Posteriormente, serão apresentados os resultados da evolução dos parâmetros em valores médios e distribuídos e as discussões dos fenômenos envolvidos nos casos de mudança de direção, ascendente e descendente.

Com o intuito de auxiliar o entendimento das análises que serão apresentadas ao longo do texto, realizaram-se vídeos dos fenômenos observados. Os hiperlinks que dão acesso aos vídeos estão disponíveis no Apêndice C. Além disso, todos os valores médios e os respectivos desvios padrões dos parâmetros característicos do escoamento em golfadas, para todos os cenários, encontram-se no Apêndice D.

### 4.1 GRADE DE TESTES

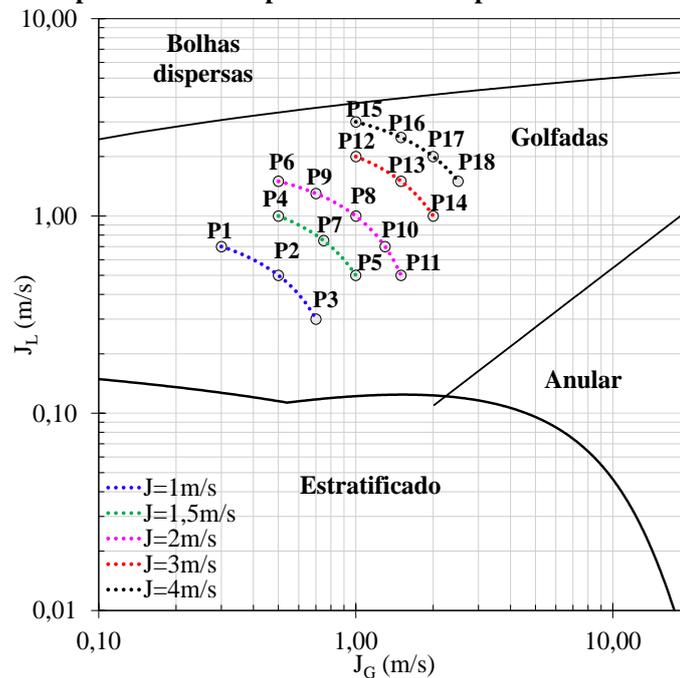
Antes de realizar o procedimento de medição, foi definida a grade experimental para o presente estudo. A Tabela 2 apresenta as 18 combinações de velocidades superficiais para a seção horizontal de 0,026 m de diâmetro. Os pares de velocidades foram observados experimentalmente como sendo no padrão golfadas, conforme aponta o mapa de escoamento de Taitel e Dukler (1976) mostrado na Figura 28, onde podem ser observadas as linhas de transição teóricas entre os padrões de escoamento. Na Figura 28, também se observam as linhas tracejadas que representam as velocidades de mistura constantes.

Tabela 2 - Grade de testes experimental.

Ponto	$J_G$ (m/s)	$J_L$ (m/s)	Ponto	$J_G$ (m/s)	$J_L$ (m/s)
P01	0,3	0,7	P10	1,3	0,7
P02	0,5	0,5	P11	1,5	0,5
P03	0,7	0,3	P12	1,0	2,0
P04	0,5	1,0	P13	1,5	1,5
P05	1,0	0,5	P14	2,0	1,0
P06	0,5	1,5	P15	1,0	3,0
P07	0,75	0,75	P16	1,5	2,5
P08	1,0	1,0	P17	2,0	2,0
P09	0,7	1,3	P18	2,5	1,5

Fonte: autoria própria.

Figura 28 - Pontos experimentais comparados com o mapa de fluxo de Taitel e Dukler (1976).



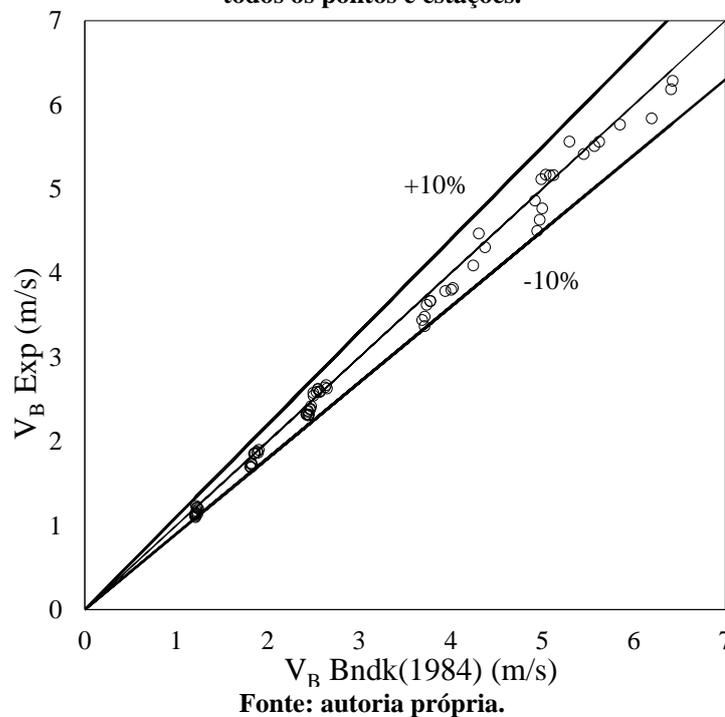
## 4.2 ESCOAMENTO HORIZONTAL

Nessa seção, serão discutidos os resultados gerais obtidos para a configuração horizontal que serão utilizados como referência para a mudança de direção. Além disso, os parâmetros característicos do escoamento em golfadas serão comparados com as correlações encontradas na literatura com o intuito de analisar as tendências dos dados, iniciando com a velocidade da bolha alongada, depois a frequência de passagem das células unitárias, os comprimentos do pistão e da bolha alongada, a fração de vazio na bolha e, por fim, o fator de intermitência.

#### 4.2.1 Velocidade da Bolha Alongada

A velocidade da bolha alongada foi calculada conforme o processamento dos dados dos sensores resistivos descrito na Seção 3.5, na página 61. Os valores médios obtidos de velocidade da bolha alongada para todos os pontos experimentais e para todas as estações de medição foram comparados com a correlação proposta por Bendiksen (1984) na Figura 29. Observou-se que os valores possuem uma variação média de 3,5% e máxima menor do que 10% em relação a Bendiksen (1984), tendo assim uma boa concordância entre o modelo e os dados experimentais.

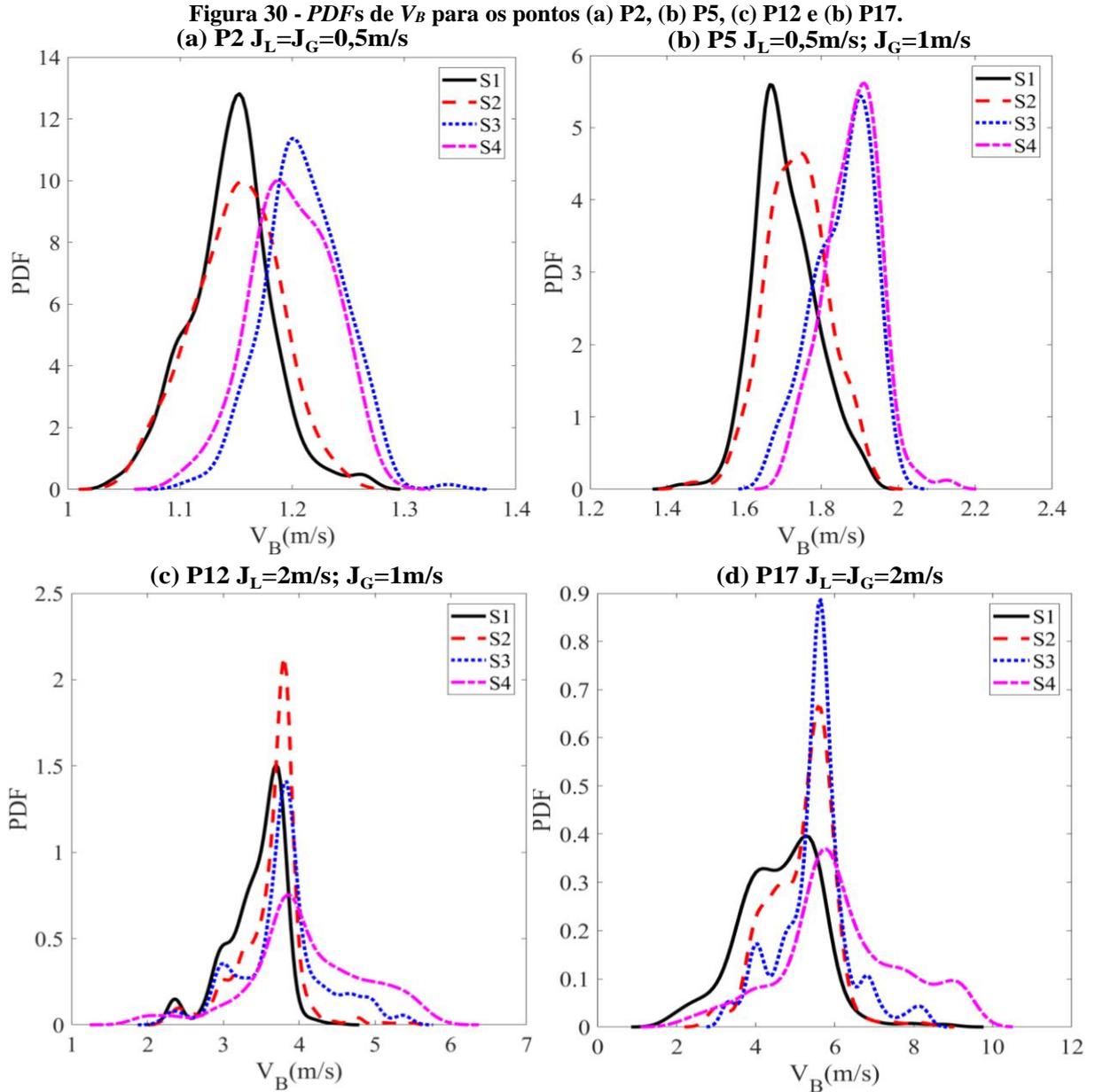
**Figura 29 - Comparação dos valores médios  $V_B$  experimental com a correlação de Bendiksen (1984) para todos os pontos e estações.**



A Figura 30 expõe os valores distribuídos da velocidade da bolha alongada em *PDFs* para quatro pontos e para as quatro estações de medição. Pode-se perceber que a velocidade da bolha alongada possui características de uma distribuição do tipo normal para todos os pontos, conforme apontaram Nydal, Pintus e Andreussi (1992).

As Figuras 30 (a) e (b) referem-se aos pontos P2 e P5 que possuem as mesmas velocidades superficiais de líquido ( $J_L=0,5$  m/s), porém as velocidades superficiais de gás ( $J_G$ ) são 0,5 e 1,0 m/s, respectivamente. Comparando essas duas figuras, torna-se possível observar que para um mesmo  $J_L$ , o  $V_B$  aumenta conforme aumenta-se o  $J_G$ , o que era de se esperar pois a bolha acelera proporcionalmente a velocidade da mistura ( $J$ ). O mesmo pode ser visto nas Figuras 30 (c) e (d) que são para os pontos P12 e P17, os quais também possuem o mesmo

$J_L=2,0$  m/s, mas com  $J_G=1,0$  e  $J_G=2,0$  m/s, respectivamente. Quanto maior o  $J_G$ , maior será a velocidade da bolha para um mesmo  $J_L$ .



Fonte: autoria própria.

Outro fator que pode ser analisado é a evolução do escoamento ao longo da tubulação. No caso do ponto P2, na Figura 30 (a), as curvas das distribuições deslocam-se para a direita de uma estação para outra, configurando-se um aumento na velocidade média da bolha. Essa aceleração é realizada principalmente pela queda de pressão ao longo da tubulação que provoca expansão do gás e o aumento de sua velocidade, conseqüentemente.

Contudo, para a última estação (S4), observa-se um deslocamento para a esquerda, ou seja, uma diminuição da velocidade média e isso é observado para pontos com baixas vazões,

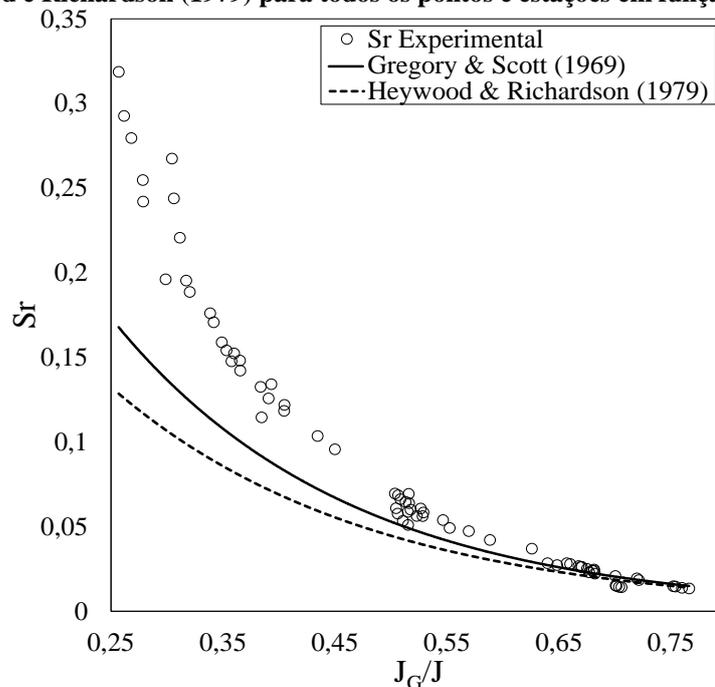
cuja velocidade da mistura é de  $J=1$  m/s (P1, P2 e P3). Acredita-se que a desaceleração encontrada nesses pontos é provocada pelo efeito de saída que é mais acentuado em pontos onde a queda de pressão que acelerava a bolha é vencida por este efeito.

O ponto P5, ilustrado na Figura 30 (b), também possui uma aceleração da velocidade da bolha até a estação S3 e depois mantêm-se praticamente constante até a última estação (S4), não apresentando o comportamento de desaceleração na última estação. Porém, após a estação S4, provavelmente existirá um ponto que o efeito de saída começará a diminuir a velocidade da bolha alongada. Para os outros dois casos, nas Figuras 30 (c) e (d), onde as vazões e, conseqüentemente, a queda de pressão são mais elevadas por conta das velocidades das misturas iguais a 3 e 4 m/s, respectivamente, a velocidade da bolha tende a acelerar até o fim da tubulação.

#### 4.2.2 Frequência das Golfadas

A frequência das golfadas ( $f$ ) é encontrada a partir do processamento conforme a Equação (25), apresentada no Subseção 2.2.4, Página 33. Os valores para todas as estações e para todos os pontos são mostrados na Figura 31.

**Figura 31 - Comparação da frequência adimensional ( $Sr$ ) com as correlações de Gregory e Scott (1969) e Heywood e Richardson (1979) para todos os pontos e estações em função do  $J_G/J$ .**



Fonte: autoria própria.

A frequência foi comparada com as correlações clássicas de Gregory e Scott (1969) e Heywood e Richardson (1979), expressas nas Equações (27) e (28), porém sob a forma adimensional do número de Strouhal ( $St$ ), que foi definido na Equação (31), em relação a velocidade superficial de gás adimensionalizada pela velocidade da mistura ( $J_G/J$ ), também apresentadas na Subseção 2.2.4, Página 33.

Analisando a Figura 31, pode-se perceber que os dados experimentais seguem a mesma tendência das correlações clássicas, apesar do erro médio de 45% entre os valores. E como salientado por Antunes et al. (2014), as correlações encontradas na literatura para frequência possuem diferenças entre elas pois, normalmente, servem apenas para as situações em que se basearam.

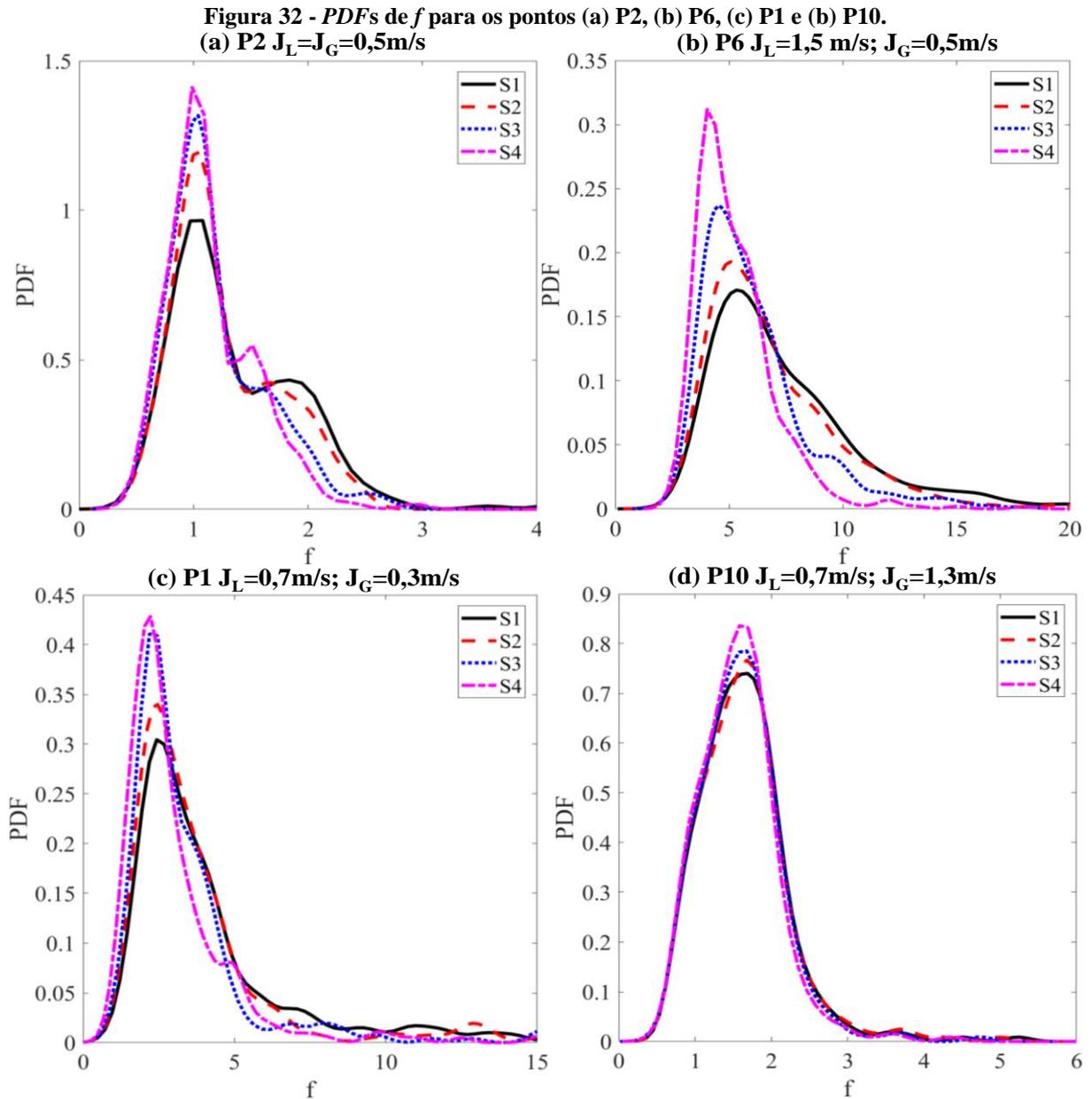
Além disso, pode-se observar que, como já era esperado, um incremento do gás faz com que a frequência das golfadas diminua. Isto porque, analisando uma mesma célula unitária, a maior quantidade de gás faz com que maior seja o comprimento da bolha em relação ao pistão de líquido, aumentando assim o tempo de passagem da célula unitária, levando a uma menor frequência das golfadas.

As distribuições da frequência podem ser observadas na Figura 32. Como apontado por Vicêncio (2013), a distribuição da frequência das golfadas assemelha-se a uma distribuição do tipo log-normal.

Comparando as Figuras 32 (a) e (b), a respeito dos pontos P2 ( $J_L=J_G=0,5\text{m/s}$ ) e P6 ( $J_L=1,5\text{ m/s}$ ;  $J_G=0,5\text{m/s}$ ), respectivamente, pode-se avaliar que há um aumento dos valores das frequências quando se aumenta os valores de  $J_L$ . Isto ocorre uma vez que, para um mesmo  $J_G$ , quando se aumenta  $J_L$ , as bolhas tendem a serem menores, existindo mais pistões entre elas e com isso mais células unitárias vão passar naquela seção transversal, em um mesmo período de tempo. O contrário também ocorre, nas Figuras 32 (c) e (b), que mostram os pontos P1 ( $J_L=0,7$ ;  $J_G=0,3\text{m/s}$ ) e P6 ( $J_L=0,7$ ;  $J_G=1,3\text{m/s}$ ), quando se mantêm constante o  $J_L$  e aumenta-se o  $J_G$ , a frequência das golfadas tende a diminuir. Isto dá-se, justamente, pela presença de bolhas maiores no escoamento que gera uma menor passagem de células unitárias no mesmo período de tempo.

No que diz respeito à evolução da frequência das golfadas, percebe-se que  $f$  tende a diminuir de uma estação para outra em todos os pontos, pois a curva de distribuição vai tendendo para esquerda. Isso era esperado, pois, ao longo do escoamento, as interações entre bolhas provocam coalescências, diminuindo o número de células unitárias. Além disto, como afirmam Nicholson, Aziz e Gregory (1978), a frequência é um fenômeno de entrada e a medida

que o escoamento vai para a jusante, ela tende a estabilizar em um valor, já que a taxa de coalescência vai diminuindo.



Ademais, nas Figuras 32 (a), (b) e (c) percebe-se que quanto maior  $J_L$  em relação ao  $J_G$ , maior é a variação de  $f$  entre uma estação e outra, pois, observa-se um maior deslocamento da curva de distribuição. Isto pode ser explicado pela diminuição das bolhas e maior presença de células unitárias interagindo mais umas com as outras, aumentando a taxa de coalescência no escoamento e fazendo com que  $f$  varie mais ao longo da tubulação. Na Figura 32 (d), nota-se o contrário, para um  $J_G$  maior que o  $J_L$  praticamente não há variação na frequência das golfadas,

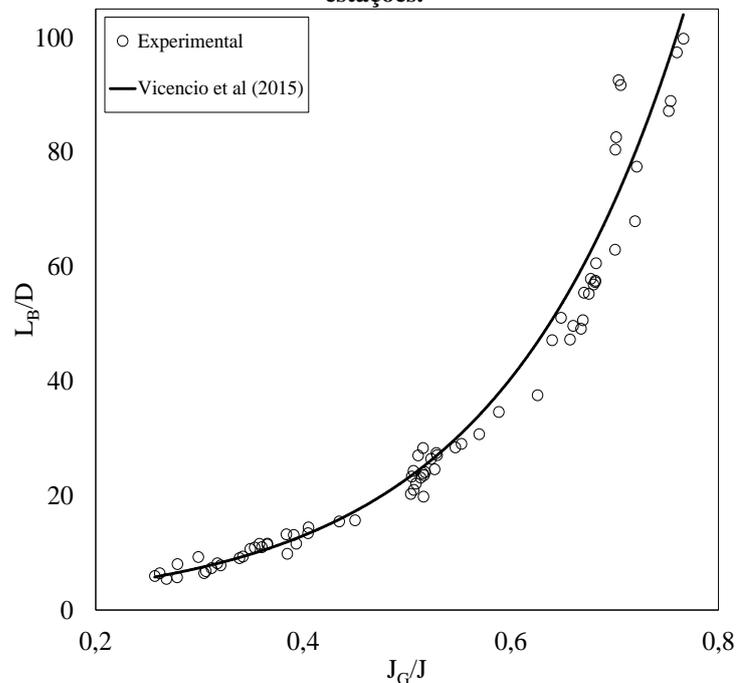
por conta da maior presença de gás que faz com que as bolhas sejam maiores, tendo menos pistões e uma taxa de coalescência menor.

#### 4.2.3 Comprimento da Bolha

Tendo posse dos valores das velocidades das bolhas ( $V_B$ ) e dos períodos ( $T_B$ ) que cada bolha levou para passar pelo sensor resistivo, torna-se possível o cálculo dos comprimentos das bolhas ( $L_B$ ) conforme a Equação (47). Os valores médios encontrados de  $L_B$  adimensionalizados pelo diâmetro da tubulação ( $D$ ) foram comparados com a correlação empírica proposta por Vicencio et al. (2015), descrita na Equação (60), e mostrados na Figura 33. Observa-se que a correlação segue a tendência dos dados experimentais, com erro médio absoluto de 10%. Ainda, a partir da Figura 33, depreende-se que o  $L_B$  tende a aumentar com  $J_G$ , como era esperado, visto que um maior  $J_G$ , significa maior vazão de gás e, conseqüentemente, uma massa maior de gás na tubulação.

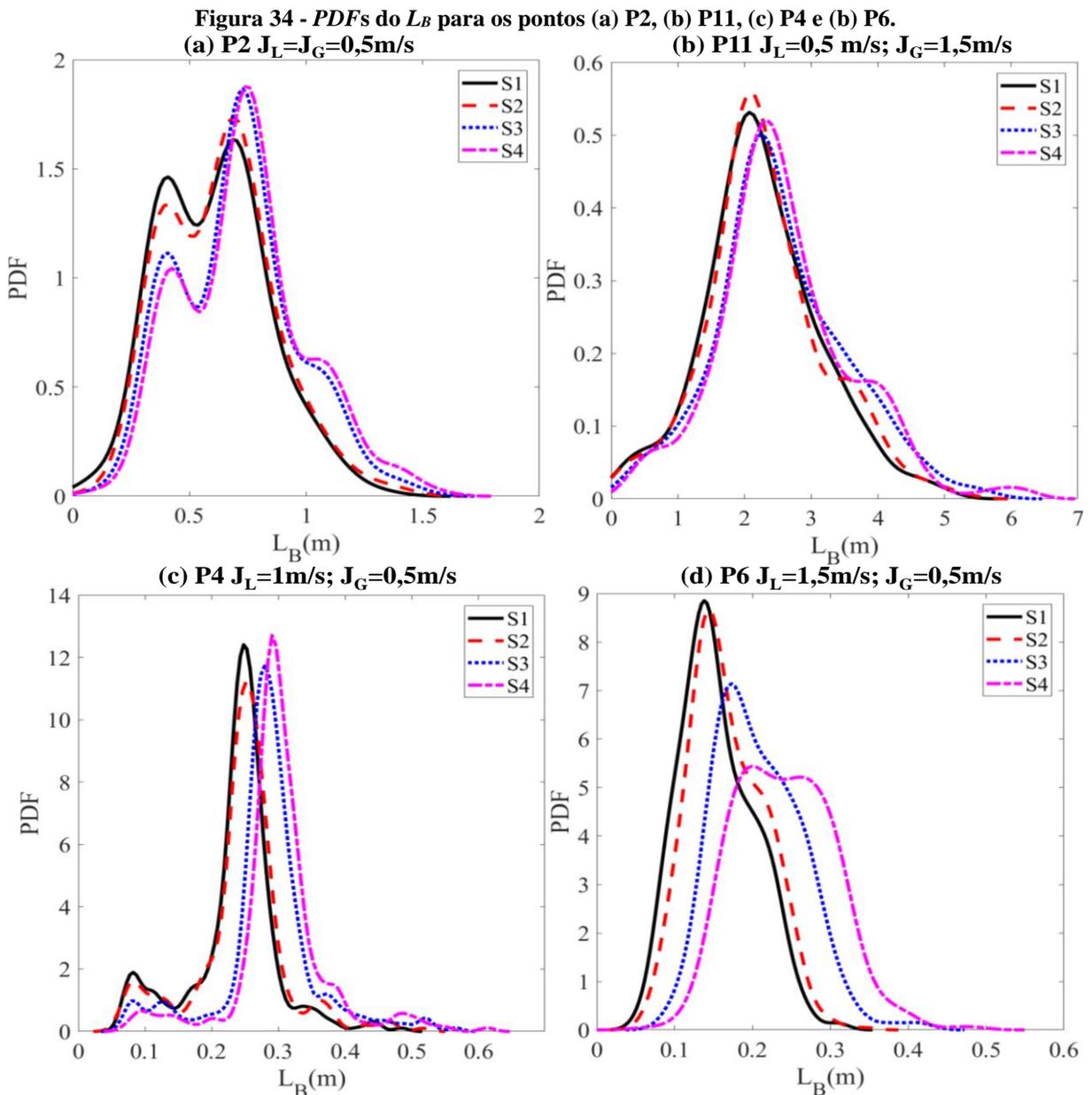
$$\frac{L_B}{D} = 1,34 \exp\left(5,68 \frac{J_G}{J}\right) \quad (60)$$

**Figura 33 - Comparação de  $L_B/D$  médio com a correlação de Vicencio et al. (2015) para todos os pontos e estações.**



Fonte: autoria própria.

A Figura 34 exibe as distribuições do comprimento da bolha para quatro pontos experimentais. Como já havia sido observado por Nydal, Pintus e Andreussi (1992), a distribuição do  $L_B$  assume um formato típico de uma distribuição normal. Além disso, nas Figuras 34 (a) e (b), como mencionado anteriormente, pode-se notar que o aumento do  $J_G$  proporciona um aumento significativo no  $L_B$ , por exemplo, o aumento de 1 m/s entre o ponto P2 e P11, para um  $J_L$  constante, quadruplicou o tamanho das bolhas alongadas.



Fonte: autoria própria.

Em contrapartida, analisando-se as Figuras 34 (c) e (d), onde manteve-se constante o  $J_G$  e aumentou-se o  $J_L$ , exemplificado pelos pontos P4 e P6, percebeu-se que esse incremento no líquido diminui o  $L_B$ , mas é quase insignificante quando comparado a mudança que o  $J_G$

provoca. A respeito da evolução do  $L_B$  ao longo das estações, nota-se o aumento pelo deslocamento das curvas para a direita, esse cenário repetiu-se para todos os pontos experimentais. Este aumento era esperado, já que, existem dois mecanismos que o provocam, a coalescência das bolhas e a expansão delas devido à queda de pressão.

O mecanismo da coalescência de bolhas apesar de ter a possibilidade de ocorrer em toda a tubulação, ele é mais significativo em seu início, onde há uma maior interação entre as bolhas que estão em desenvolvimento. A coalescência das bolhas provoca um aumento significativo no  $L_B$ , pois as bolhas praticamente dobram de tamanho. Como a primeira estação estava a 14,2 m (545 D) da região de entrada, o número de coalescências nesta região já é bastante reduzido, restando a queda de pressão na tubulação como o mecanismo principal para o aumento do  $L_B$ , até a saída do escoamento. Este mecanismo provoca um aumento mais gradual do que o comparado ao da coalescência, como pode ser visto na Figura 34, onde as curvas possuem um deslocamento pequeno de uma estação para outra.

#### 4.2.4 Comprimento do Pistão

O comportamento dos comprimentos adimensionais dos pistões ( $L_S/D$ ) pode ser observado na Figura 35 (a) em relação a multiplicação entre os números de Reynolds da mistura e de Strouhal, como sugeriu Vicencio (2013), onde  $L_S/D$  é inversamente proporcional à  $Re_J Sr$ . Portanto, quanto maior a frequência das golfadas e as vazões das fases, menor será o comprimento dos pistões, isto porque, se há mais golfadas passando em um mesmo tempo, o líquido tende a se distribuir em mais pistões, diminuindo seu comprimento.

Portanto, quanto maior forem as vazões das fases, maior será a queda de pressão fazendo com que haja uma maior expansão da bolha alongada que aumenta o comprimento das bolhas e mais líquido migrará do pistão para a região do filme, diminuindo o comprimento do pistão. Além disto, nas Figuras 35 (a) e (b) compararam-se os valores experimentais do  $L_S/D$  em relação a correlação empírica proposta por Vicencio et al. (2015), expressa na Equação (61):

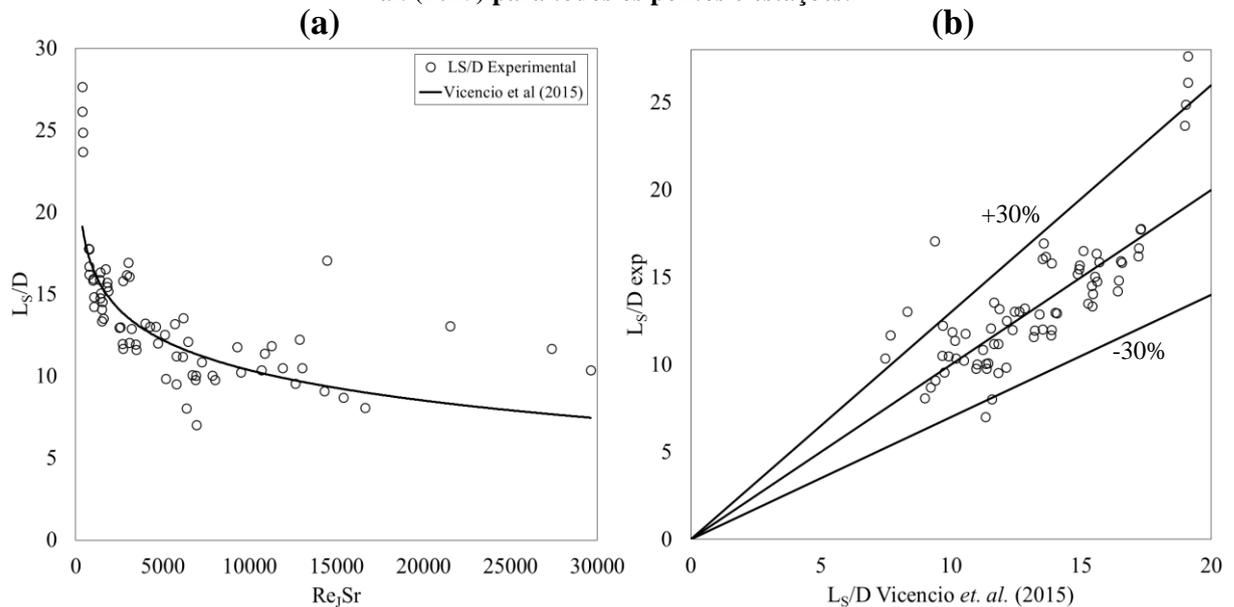
$$\frac{L_S}{D} = 2,67 \ln \left( \frac{4,84 \times 10^5}{Re_J Sr} \right) \quad (61)$$

Observa-se que, a correlação tende a seguir o comportamento dos valores experimentais, mas o erro entre elas está em uma faixa de 30%, como mostrado na Figura 35 (b). Além disto,

notou-se que, a influência maior no  $L_S/D$  é provocada pelo número de Strouhal, ou seja, pela frequência das golfadas. Pois, como comentado anteriormente, o aumento da bolha que é provocado pela expansão da bolha é muito menor do que o provocado pela coalescência entre elas, que está justamente relacionada à frequência das golfadas.

Ainda sobre Figura 35 (a), observam-se que os comprimentos médios dos pistões estão na faixa entre 7 D e 28 D, aproximadamente. Dukler e Hubbard (1975) afirmaram que para escoamento horizontal bem desenvolvido os pistões estão entre 12 D e 30 D, portanto os valores médios observados estão de acordo com os observados na literatura.

**Figura 35 - (a)  $L_S/D$  em comparação com  $Re_jSr$  e (b)  $L_S/D$  experimental em comparação com Vicencio et al. (2015) para todos os pontos e estações.**

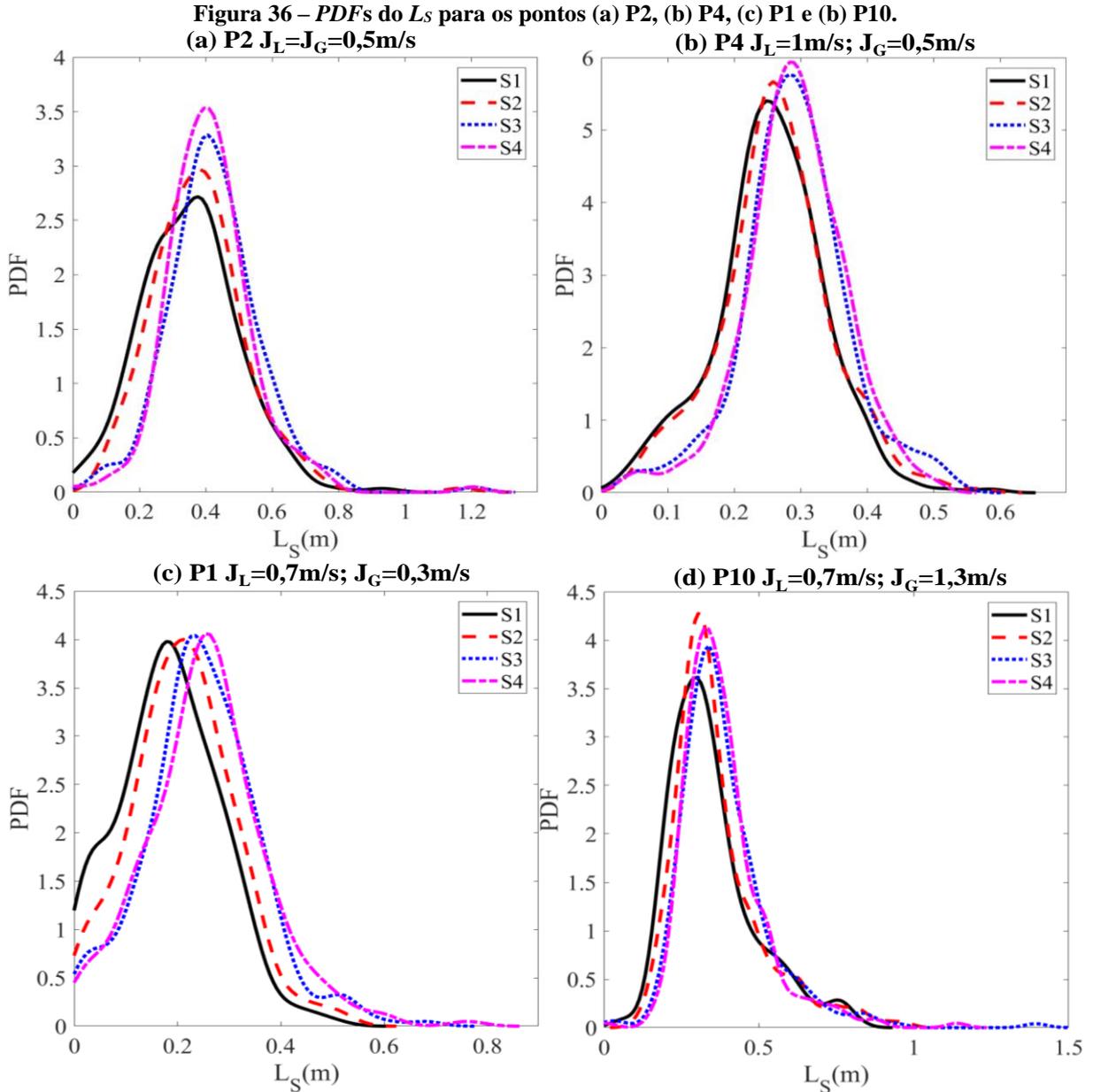


Fonte: autoria própria.

A Figura 36 expõe as distribuições do comprimento dos pistões ( $L_S$ ) de quatro pontos experimentais para as quatro estações de medição. Conforme ressaltou Brill et al. (1981), o  $L_S$  segue uma distribuição do tipo log-normal, o mesmo comportamento foi observado para os outros pontos experimentais.

Comparando-se as Figuras 36 (a) e (b), observa-se que quando se mantém constante o  $J_G$ , e aumenta-se o  $J_L$  de 0,5 m/s para 1 m/s do ponto P2 para o ponto P4, o  $L_S$  tende a ser menor. Isto acontece pois, com um maior  $J_L$ , menor será a bolha, então mais células unitárias vão existir, distribuindo o volume de líquido em um maior número de pistões, diminuindo o comprimento destes. O contrário é observado, justamente, nas Figuras 36 (c) e (d) correspondendo, respectivamente aos pontos P1 e P10, onde para um mesmo  $J_L$ , o aumento de  $J_G$  de 0,3 m/s para 1,3 m/s, aumenta-se o comprimento dos pistões. Neste caso, as bolhas

aumentaram de comprimento, menos células unitárias existem e mais líquido estará em um menor número de pistões, incrementando-os, portanto.



Fonte: autoria própria.

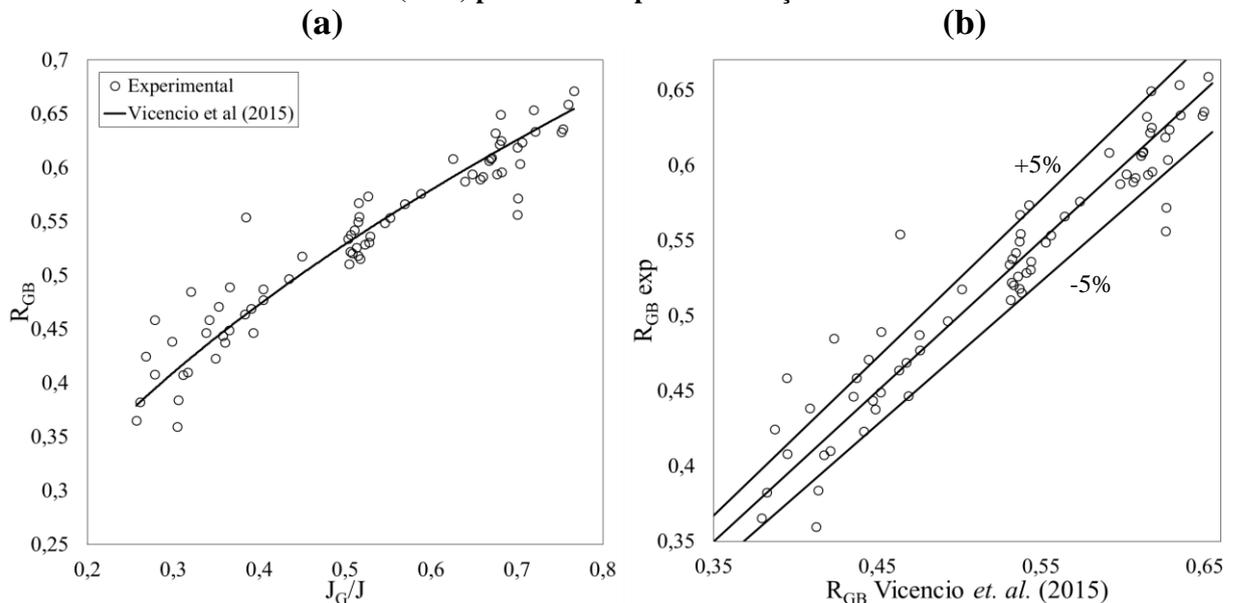
Referindo-se à evolução do  $L_S$  ao longo da tubulação, na Figura 36, para os quatro casos, pode-se perceber que o comprimento do pistão aumenta nas três primeiras estações, pois as curvas deslocam-se para a direita. Porém, da terceira (S3) para última (S4), nota-se uma estabilização da distribuição, que provoca as vezes um leve deslocamento da curva para esquerda ou apenas mantêm-se no mesmo lugar da terceira estação, possivelmente devido o escoamento estar estabelecido para estes casos.

#### 4.2.5 Fração de Vazio na Bolha

A fração de vazio na bolha ( $R_{GB}$ ) foi calculada conforme a Equação (49) e foi comparada, na Figura 37, com a relação empírica desenvolvida por Vicencio et al. (2015) e expressa na Equação (62):

$$R_{GB} = 0,748 \left( \frac{J_G}{J} \right)^{0,5} \quad (62)$$

**Figura 37 - (a)  $R_{GB}$  em comparação com  $J_G/J$  e (b)  $R_{GB}$  experimental em comparação com Vicencio et al. (2015) para todos os pontos e estações.**

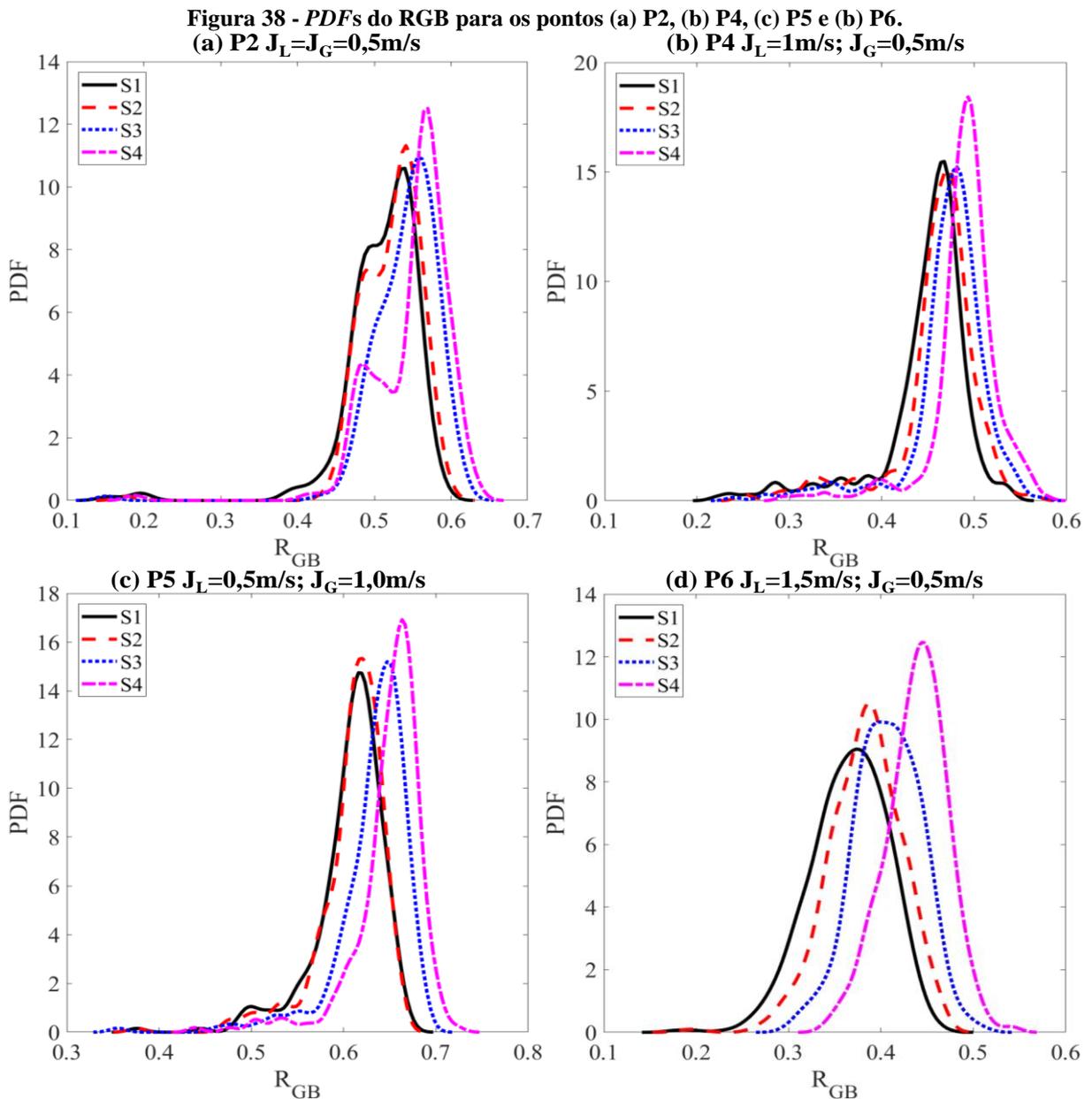


Fonte: autoria própria.

A fração de vazio na bolha como já era esperado tende a aumentar com o aumento do  $J_G$ , conforme mostra a Figura 37 (a), uma vez que, uma maior massa de gás ocupa a tubulação. A Figura 37 (b) expõe a comparação entre os dados experimentais e a Equação (62), cujos erros ficaram em torno de 5% de erro médio e 16% de erro máximo, mostrando uma boa concordância.

A Figura 38 exhibe as distribuições do  $R_{GB}$  para quatro pontos experimentais. Observa-se o comportamento aproximado ao tipo normal, mas a distribuição do tipo Weibull pode ser uma boa aproximação, por possuir uma maior flexibilidade. Comparando-se as Figuras 38 (a) e (b), referentes aos pontos P2 e P6, que possuem o mesmo  $J_G=0,5\text{m/s}$ , mas  $J_L=0,5$  e  $1,5$  m/s, respectivamente, nota-se que um aumento no  $J_L$  provoca uma diminuição no  $R_{GB}$ , por conta do deslocamento para a esquerda das curvas.

A presença maior de líquido, por conta do aumento de sua vazão, faz com que o gás na região da bolha ocupe uma área menor da seção transversal, além de aumentar a recirculação na região da cauda da bolha, retirando mais gás para o pistão, como podem ser observados nos Vídeo 01 e Vídeo 02, que se referem aos pontos P2 e P6, respectivamente. No Vídeo 02 há uma linha no centro da tubulação e com isso pode-se observar que no caso do P2 a bolha alongada ocupa mais da metade área transversal da tubulação, corroborando com a Figura 38 (a). Para o P6, a bolha encontra-se no máximo no centro da tubulação, como demonstrado na Figura 38 (d).



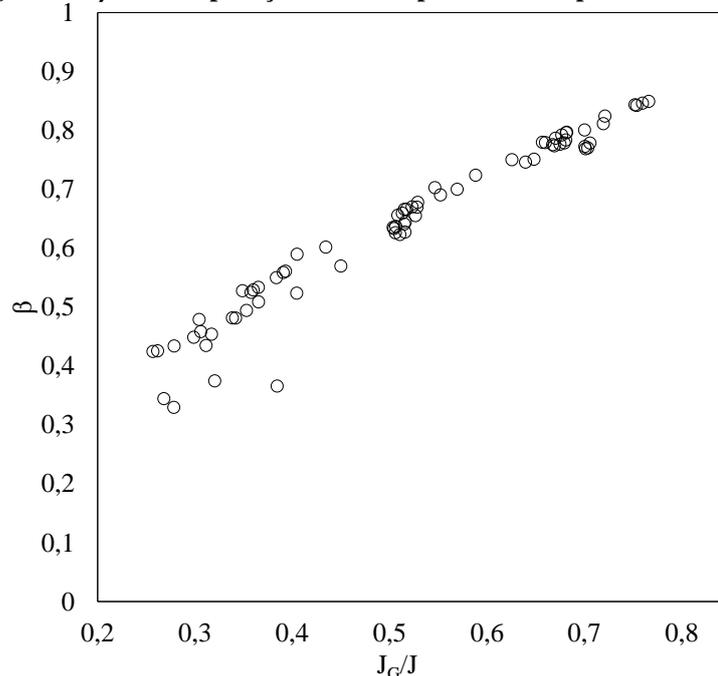
Comparando-se as Figuras 38 (a) e (c), onde é mantido constante o  $J_L=0,5$  m/s e é aumentado o  $J_G$  de 0,5 m/s para 1 m/s, observa-se justamente o aumento do  $R_{GB}$  por conta da

presença maior de gás na tubulação. E por fim, em relação à evolução, para todos os pontos, o  $R_{GB}$  tende a aumentar ao longo da tubulação. Isto é provocado pela expansão do gás na tubulação, provocado pela queda de pressão, fazendo com que ocupe uma maior área na tubulação à medida que o escoamento vai à jusante.

#### 4.2.6 Fator de Intermitência

O fator de intermitência ( $\beta$ ) é uma ponderação da ocorrência da bolha em relação ao comprimento, como discutido na Subseção 2.2.5, na página 35. Este fator pode ser usado, portanto, para quantificar a intermitência do escoamento. A Figura 39 exibe o  $\beta$ , calculado pela Equação (33), em função da velocidade superficial de gás adimensional ( $J_G/J$ ), a qual pode-se observar que existe uma dependência entre eles. Como esperado, o  $\beta$  tende a aumentar com o aumento da velocidade superficial do gás, uma vez que, maior será a proporção da bolha na célula unitária.

**Figura 39 -  $\beta$  em comparação com  $J_G/J$  para todos os pontos e estações.**



**Fonte: autoria própria.**

Analisando a Figura 39 percebe-se que, como visto na literatura, os valores para este fator ficam em uma faixa entre 0,3 e 0,9 e que evoluem quase linearmente com o aumento da velocidade superficial adimensional. Apenas quatro pontos apresentam-se fora deste comportamento, que são os resultados das quatro estações do ponto P15 ( $J_L=3\text{m/s}$  e  $J_G=1\text{m/s}$ ),

que se observado no mapa de fluxo na Figura 28, na página 71, é o ponto mais próximo da região de bolhas dispersas.

Segundo a definição de Shoham (2006), para o escoamento em golfadas em uma tubulação horizontal e levemente inclinada, a bolha alongada escoam na parte de cima da tubulação seguida de um pistão de líquido que pode ou não conter bolhas dispersas. Nestes termos, analisando a Figura 40 e o Vídeo 03, observa-se que as bolhas alongadas escoam no meio da tubulação, com bolhas dispersas à sua volta. Acredita-se, portanto, que para esse par de velocidades, o escoamento encontra-se em uma região de transição entre o padrão golfadas e o bolhas dispersas. Sendo descartado das análises sobre o escoamento em golfadas.

**Figura 40 – Exemplo do escoamento do ponto P15 ( $J_L=3\text{m/s}$  e  $J_G=1\text{m/s}$ ).**

**Direção do escoamento**



Fonte: autoria própria.

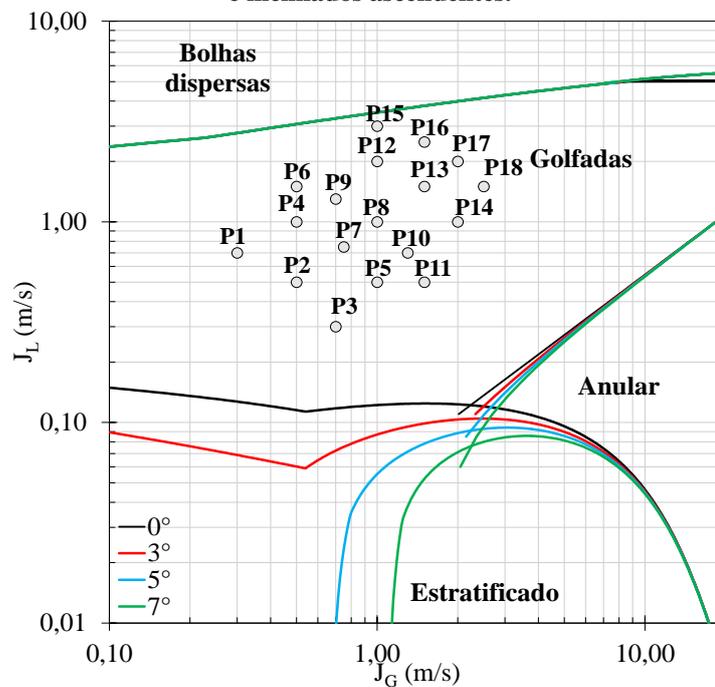
### 4.3 ESCOAMENTO HORIZONTAL COM LEVE MUDANÇA NA DIREÇÃO ASCENDENTE

A presença de uma seção inclinada pode modificar as estruturas de um padrão de escoamento ou, até mesmo, mudar o seu tipo, como por exemplo um escoamento estratificado pode se tornar um escoamento em golfadas quando passa de uma região horizontal para uma ascendente. Ou então, o escoamento em golfadas pode mudar para o escoamento estratificado indo de uma região horizontal para descendente, como discutido na Seção 2.3, na página 38. Portanto, faz-se necessário identificar como os padrões de escoamento comportam-se em regiões ascendentes em relação ao horizontal.

A Figura 41 mostra o mapa de fluxo proposto por Taitel e Dukler (1976) para as inclinações de  $0^\circ$ ,  $+3^\circ$ ,  $+5^\circ$  e  $+7^\circ$ . Os pontos experimentais que foram utilizados estão identificados no mapa e na Tabela 2. Observa-se que para todos os pontos, o escoamento é do padrão golfadas, o que experimentalmente foi corroborado pois, para os casos ascendentes não ocorreu nenhuma mudança de padrão.

No caso de inclinações ascendentes, como apontado por Barnea et al. (1980), a região do escoamento em golfadas aumenta à medida que a do estratificado diminui mesmo que para baixas inclinações. Desta maneira, o escoamento em golfadas tem uma ocorrência mais susceptível para uma maior faixa de vazões de líquido e gás. O que se observa é que o aumento da inclinação faz com que a região do estratificado fique em uma região encapsulada entre o escoamento em golfadas e o anular. Até que para inclinações maiores do que  $+ 10^\circ$  este tipo de padrão não é mais observado, segundo Barnea et al. (1980). Observa-se também na Figura 41 que, para inclinações até  $+ 7^\circ$ , as outras transições de padrão praticamente não variam com a mudança de inclinação, devido principalmente às forças inerciais serem mais fortes do que as gravitacionais para essas vazões.

**Figura 41 - Pontos experimentais no mapa de fluxo de Taitel e Dukler (1976) para escoamentos horizontal e inclinados ascendentes.**

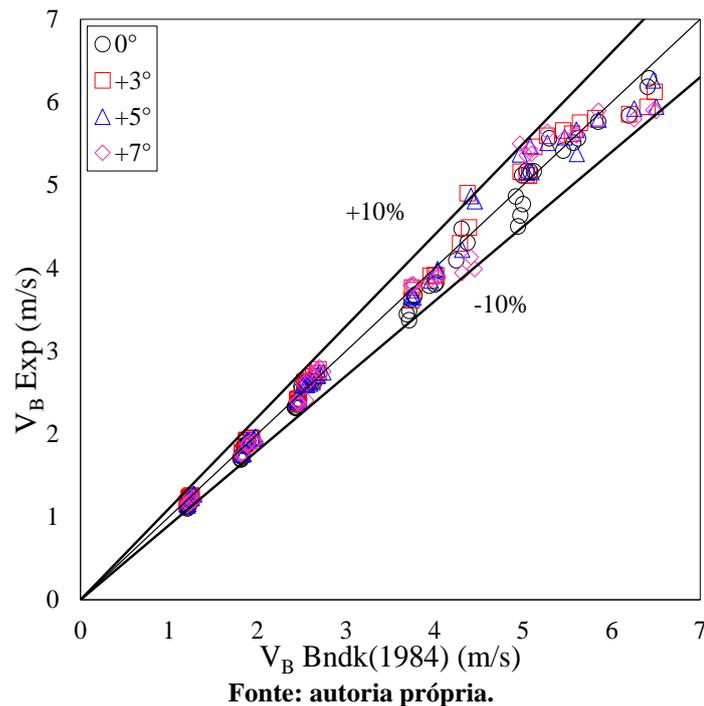


#### 4.3.1 Velocidade da Bolha

Segundo Greskovich e Cooper (1975), a velocidade da bolha é uma função direta do ângulo de inclinação da tubulação, dessa forma utilizou-se a correlação de Bendiksen (1984) para analisar esta influência. Esta correlação, exposta na Subseção 2.2.3, leva em conta a influência do ângulo no cálculo das velocidades das bolhas alongadas, como mostrados na Figura 42.

O caso horizontal e as três inclinações ascendentes,  $+3^\circ$ ,  $+5^\circ$  e  $+7^\circ$ , nas estações S3 e S4, estão expressos na Figura 42. Observa-se que, para os quatro casos, a velocidade da bolha experimental em comparação com a equação de Bendiksen (1984) possui uma boa concordância, com discrepâncias menores do que 10%, para todos os pontos experimentais e estações de medição.

**Figura 42 - Comparação entre o  $V_B$  e a correlação de Bendiksen (1984) para as inclinações  $0^\circ$ ,  $+3^\circ$ ,  $+5^\circ$  e  $+7^\circ$**

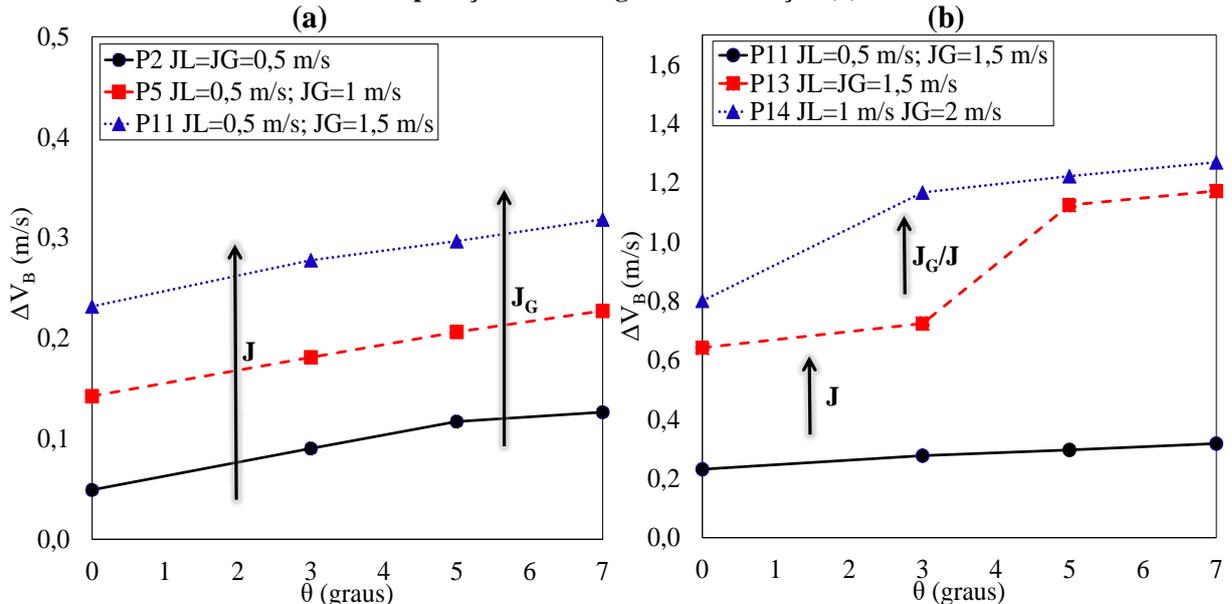


A Figura 43 mostra a variação de  $V_B$  entre as estações S4 e S2 em relação ao ângulo de inclinação ( $\theta$ ). Observa-se que a diferença de velocidade é positiva, ou seja, a velocidade tende a aumentar ao longo da tubulação. Além disso, percebe-se que esta variação tende a aumentar também com o ângulo de inclinação, o que já tinha sido comentado por Mukherjee e Brill (1983), pois a inclinação influencia o deslizamento entre as fases, podendo acelerar a bolha. Portanto, este aumento depende de dois efeitos que estão presentes no escoamento inclinado ascendente: o empuxo e a maior queda de pressão devido a coluna de líquido gerada.

Ao longo da região inclinada ascendente, o empuxo começa a ser relevante como mecanismo de aceleração da velocidade, uma vez que, sua presença é no sentido do escoamento, auxiliando a bolha a deslocar-se mais rapidamente. O outro efeito é provocado pelo aumento da queda de pressão que se intensifica por conta da coluna de líquido incrementada pelo ângulo ascendente. E quanto maior é a queda de pressão, maior será a expansão da bolha ao longo da tubulação, aumentando-se a sua velocidade.

A Figura 43 (a) representa os pontos P2, P5 e P11, onde mantêm-se constante o  $J_L=0,5\text{m/s}$  e varia-se o  $J_G$  de 0,5 até 1,5 m/s. Pode ser observado que, ao aumentar-se o  $J_G$ , a variação tende a ser maior. Isto pode ser explicado pelo maior efeito que o empuxo vai causar devido à presença de uma maior massa de gás na tubulação.

**Figura 43 - Variação do  $V_B$  entre as estações 4 e 2 para (a) os pontos P2, P5 e P11 e (b) P11, P13 e P14 em comparação com o ângulo de inclinação ( $\theta$ ).**



Fonte: autoria própria.

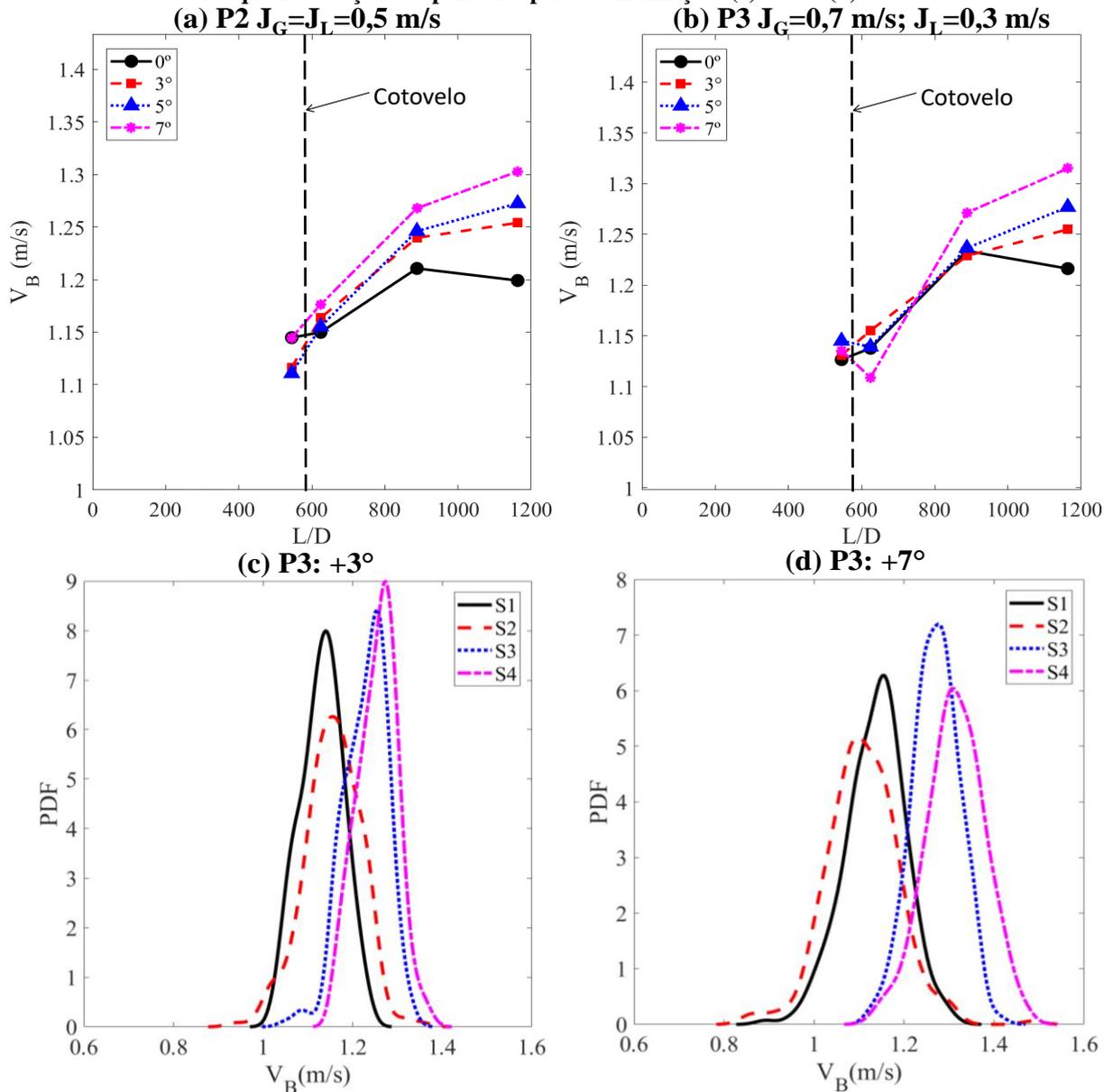
Porém, ao mesmo tempo em que se aumenta o  $J_G$ , o  $J$  também aumenta, desta forma, a Figura 43 (b) tenta isolar estas variáveis. Os pontos P11 e P13 possuem o mesmo  $J_G=1,5$  m/s, porém  $J=2$  m/s e 3 m/s, respectivamente. Enquanto que os pontos P13 e P14 possuem o mesmo  $J=3$  m/s, mas proporção de  $J_G/J=0,5$  e 0,67, respectivamente. Portanto, analisando a Figura 43 (b), percebe-se que a variação do  $J$  tende a ter um efeito maior do que a variação do  $J_G$  dentro de um mesmo  $J$ . Possivelmente, o efeito devido a maior queda de pressão provocado pelas maiores vazões do escoamento na região ascendente seja maior do que o efeito do empuxo nesta mesma região.

A Figura 44 apresenta a evolução de  $V_B$  ao longo da tubulação para todas as inclinações ascendentes e o caso horizontal. Pode-se observar que o  $V_B$ , em geral, tende a aumentar ao longo da tubulação. No caso horizontal, o  $V_B$  aumenta até a terceira estação e depois possui um decréscimo como foi discutido na Subseção 4.2.1, na página 74.

Contudo, para os casos ascendentes, devido ao empuxo e a maior queda de pressão, este tipo de comportamento não é observado, pelo contrário, o que se observa é uma aceleração da

bolha até o fim da tubulação. E esta aceleração é maior quanto maior for a inclinação, justamente por apresentar um maior empuxo e uma maior queda de pressão.

**Figura 44 - Evolução de  $V_B$  nas inclinações ascendentes para os pontos (a) P2 e (b) P3. Distribuições de  $V_B$  das quatro estações do ponto P3 para as inclinações (c)  $+3^\circ$  e (d)  $+7^\circ$ .**



Na Figura 44 (a), pode-se observar que o ponto P2 é influenciado pelo cotovelo apenas na aceleração da bolha. Contudo, na Figura 44 (b), que é referente ao ponto P3, observa-se um pequeno decréscimo na inclinação  $+5^\circ$  e um decréscimo um pouco maior em  $+7^\circ$ . Esta diminuição no  $V_B$  no ponto P3, deve-se principalmente à quebra da bolha que acontece quando a bolha é suficientemente grande para o acúmulo do líquido romper a bolha em duas quando

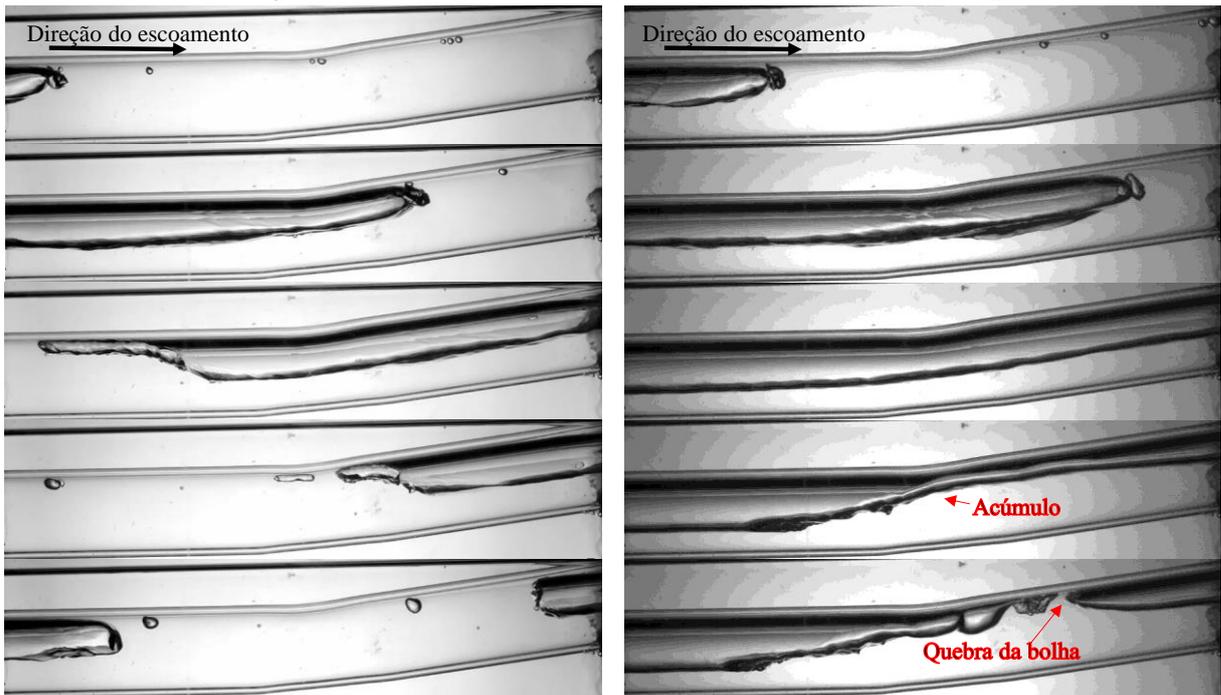
passa em um cotovelo inferior, como foi comentado na Seção 2.3 e foi esquematizado na Figura 13, na página 39.

No ponto P2, o par de velocidades gera uma bolha que não possui tamanho suficiente para ser quebrada na passagem pelo cotovelo inferior, como pode ser observado no Vídeo 04 e na Figura 45 (a). Porém, no P3, a bolha é grande o suficiente para o líquido, que volta da região ascendente e se acumula com o líquido na região horizontal indo à jusante, quebrar a bolha em duas, como mostrado no Vídeo 05 e na Figura 45 (b). Portanto, o decréscimo que acontece no  $V_B$  é por conta desta bolha formada na região do cotovelo não ser tão rápida quanto a bolha original, que começa a escoar a partir dessa região, por isso a velocidade média logo após o cotovelo é diminuída instantaneamente. Porém, conforme o escoamento se estabelece, a bolha tende a acelerar na região ascendente como discutido anteriormente.

**Figura 45 – Escoamento em um cotovelo  $+7^\circ$  dos pontos (a) P2 e (b) P3.**

**(a) P2  $J_G=J_L=0,5$  m/s**

**(b) P3  $J_G=0,7$  m/s;  $J_L=0,3$  m/s**



**Fonte: autoria própria.**

As Figuras 44 (c) e (d) mostram as distribuições de  $V_B$  ao longo da tubulação para o ponto P3 nas inclinações  $+3^\circ$  e  $+7^\circ$ . As distribuições corroboram com os valores médios, onde para a inclinação  $+3^\circ$ , na Figura 44 (c), observa-se o deslocamento das curvas para a direita, ou seja, um aumento dos valores de  $V_B$ . Contudo, na Figura 44 (d), percebe-se que entre a estação S1 e S2, a curva desloca-se levemente para a esquerda, devido à desaceleração comentada no parágrafo anterior. Nas duas últimas estações (S3 e S4), os valores tendem a

umentar, conforme indica o deslocamento para a direita das curvas, possuindo valores maiores do que no caso  $+3^\circ$ , quando se compara as Figuras 44 (c) e (d).

#### 4.3.2 Frequência das Golfadas

Não foram observadas muitas diferenças na frequência das golfadas na região ascendente em relação ao caso horizontal. A frequência das golfadas está ligada aos comprimentos e, por consequência, aos períodos das estruturas da célula unitária. Portanto, no escoamento ascendente, os pistões de líquido tendem a ser maiores do que os do escoamento horizontal e esse efeito é mais pronunciado nos pontos onde a velocidade superficial do líquido é maior do que a do gás. Maiores pistões, geram maiores tempos de passagem da célula unitária diminuindo relativamente a frequência.

Quando se têm uma maior velocidade superficial do gás do que do líquido, as bolhas tendem a serem maiores, portanto, quando passam pelo cotovelo tendem a quebrar gerando novas células unitárias ou apenas diminuindo o comprimento delas, aumentando a frequência. O que se percebe é que podem ocorrer os dois mecanismos simultaneamente, sendo assim, em geral, a frequência não possui muita diferença no ascendente em relação ao horizontal, principalmente no fim da tubulação, onde não há mais efeitos de entrada e nem do cotovelo.

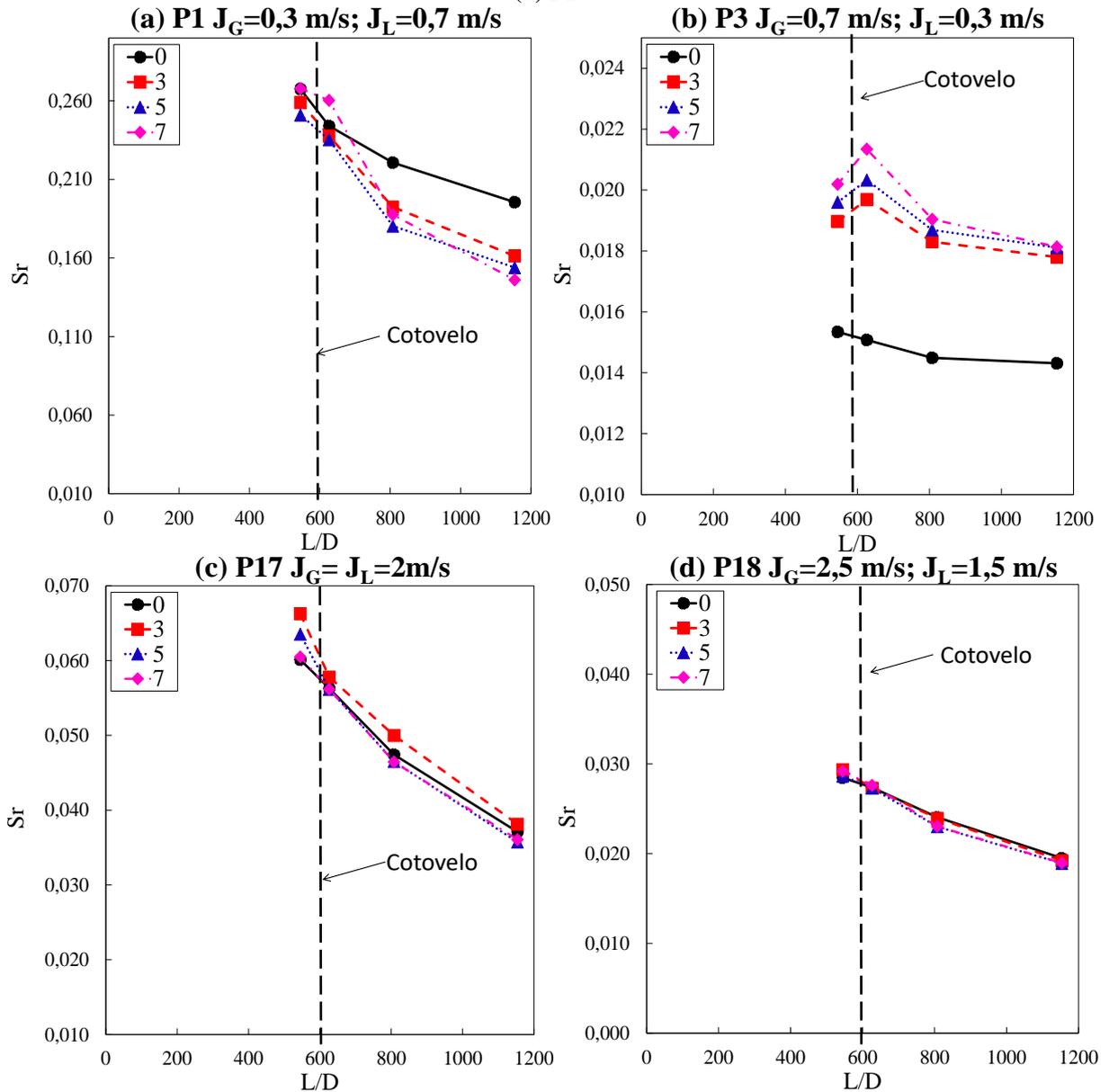
Para baixas velocidades de mistura ( $J=1$  m/s e  $J=1,5$  m/s), observam-se diferenças mais significativas na frequência, principalmente na região do cotovelo. A Figura 46 mostra a evolução da frequência adimensional ( $St$ ) ao longo da tubulação para quatro pontos dos casos ascendentes em comparação ao horizontal.

A Figura 46 (a) exprime o ponto P1 ( $J_L=0,7$  m/s;  $J_G=0,3$  m/s) de velocidade de mistura baixa que exemplifica o caso onde o  $J_L$  é maior que o  $J_G$  e após o cotovelo, na região ascendente, o pistão de líquido tende a aumentar provocando uma diminuição na frequência. No cotovelo de  $+7^\circ$ , observa-se um comportamento diferente do que se tem nos outros cotovelos para esse mesmo ponto, a queda da frequência é mais suave pois ocorre quebra da cauda da bolha que, às vezes, é contabilizada como uma nova bolha pelo sensor exatamente a frente, como pode ser melhor entendido no Vídeo 06.

A Figura 46 (b) exemplifica o caso contrário, onde o  $J_G$  é maior que o  $J_L$ , representado pelo ponto P3 ( $J_L=0,3$  m/s;  $J_G=0,7$  m/s) que possui baixa velocidade mistura. Nesse caso, existe quebra de bolha e geração de novas células unitárias, como foi mostrado no Vídeo 05 e na Figura 45, portanto, instantaneamente, a frequência de golfadas aumenta logo após o cotovelo. Ao longo da tubulação, essas novas bolhas tendem a coalescer novamente pois são instáveis, e

com isto a frequência tende a cair novamente, mas mantém-se maior do que a frequência do caso horizontal.

Figura 46 - Evolução do  $Sr$  das inclinações ascendentes e horizontal para os pontos (a) P1, (b) P3, (c) P17 e (d) P18.

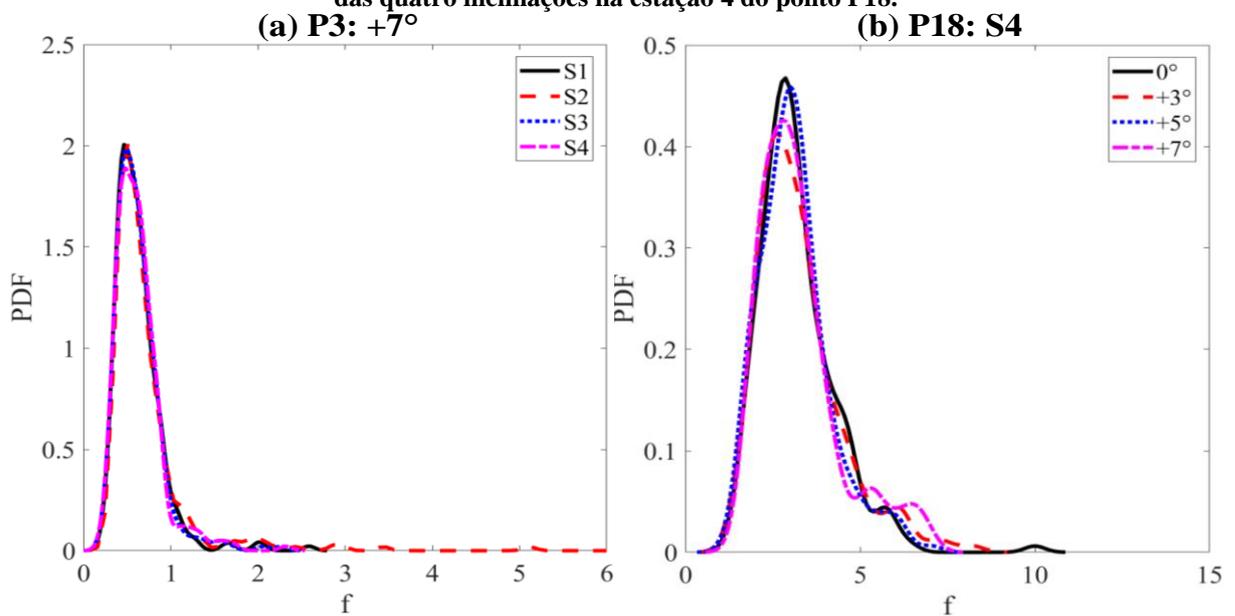


Fonte: autoria própria.

As Figuras 46 (c) e (d) expõem dois casos de velocidades de mistura mais alta ( $J=4$  m/s) que são dos pontos P17 ( $J_L=J_G=2$  m/s) e P18 ( $J_L=1,5$  m/s;  $J_G=2,5$  m/s). Nesses casos, não se observa praticamente nenhuma diferença na frequência no cotovelo e na região ascendente, uma vez que, os efeitos gravitacionais ou os acidentes da tubulação não conseguem romper os efeitos inerciais mais fortes desses pontos de alta vazão, como expressa o Vídeo 07, relativo ao ponto P18 no cotovelo.

A Figura 47 (a) mostra as distribuições da frequência do ponto P3, a qual apenas na estação S2 que são observados maiores valores para a frequência, aumentando um pouco a média na frequência logo após o cotovelo. Isto é devido às quebras de bolhas que geram novas células unitárias, aumentando a frequência, como discutido anteriormente. A Figura 47 (b) exprime as distribuições da frequência do ponto P18 na última estação (S4) para as inclinações ascendentes e a horizontal. Observa-se neste caso que não há diferença significativa nas curvas quando se modifica a inclinação, devido aos elevados efeitos inerciais.

**Figura 47 - (a) Distribuições de  $f$  das quatro estações na inclinação  $+7^\circ$  do ponto P3 e (b) distribuições de  $f$  das quatro inclinações na estação 4 do ponto P18.**



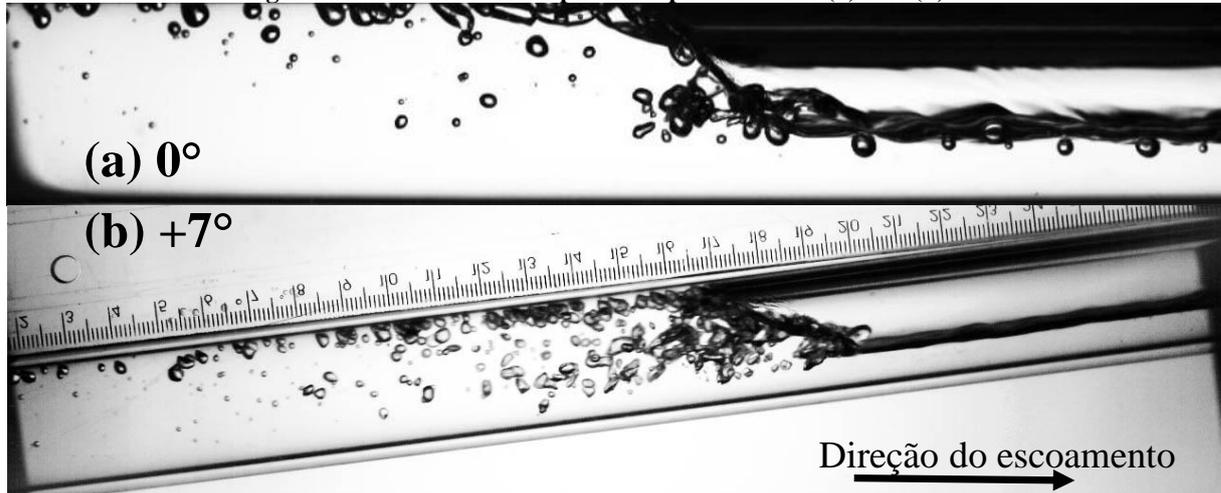
#### 4.3.3 Comprimento da Bolha

Em regiões ascendentes, observou-se que o comprimento da bolha normalmente tende a diminuir em relação ao escoamento horizontal. Este efeito é pronunciado quando se aumenta a velocidade superficial de gás. Pois, as bolhas são quebradas no cotovelo, perdem sua cauda ou então a maior recirculação provocada pelo filme de líquido que volta na região ascendente e encontra o pistão de líquido à jusante do escoamento, retira bolhas da região da bolha alongada e gera mais bolhas dispersas no pistão.

Os Vídeo 08 e Vídeo 09 e as Figuras 48 (a) e (b) mostram justamente a diferença do escoamento horizontal e ascendente do ponto P7 ( $J_L=J_G=0,75$  m/s), respectivamente. No escoamento horizontal, existem bolhas dispersas na região de mistura, porém em menor quantidade do que em comparação ao ascendente de  $+7^\circ$ , isso porque a região de mistura é provocada apenas pela diferença de velocidades do filme à frente, mais devagar, e do pistão de

líquido, mais rápido, na mesma direção. No caso ascendente, o filme está com velocidade em direção contrária à do pistão, provocando uma maior recirculação, gerando uma maior região de mistura que retira mais gás da bolha alongada.

Figura 48 – Escoamento do ponto P7 para os casos (a)  $0^\circ$  e (b)  $+7^\circ$ .



Fonte: autoria própria.

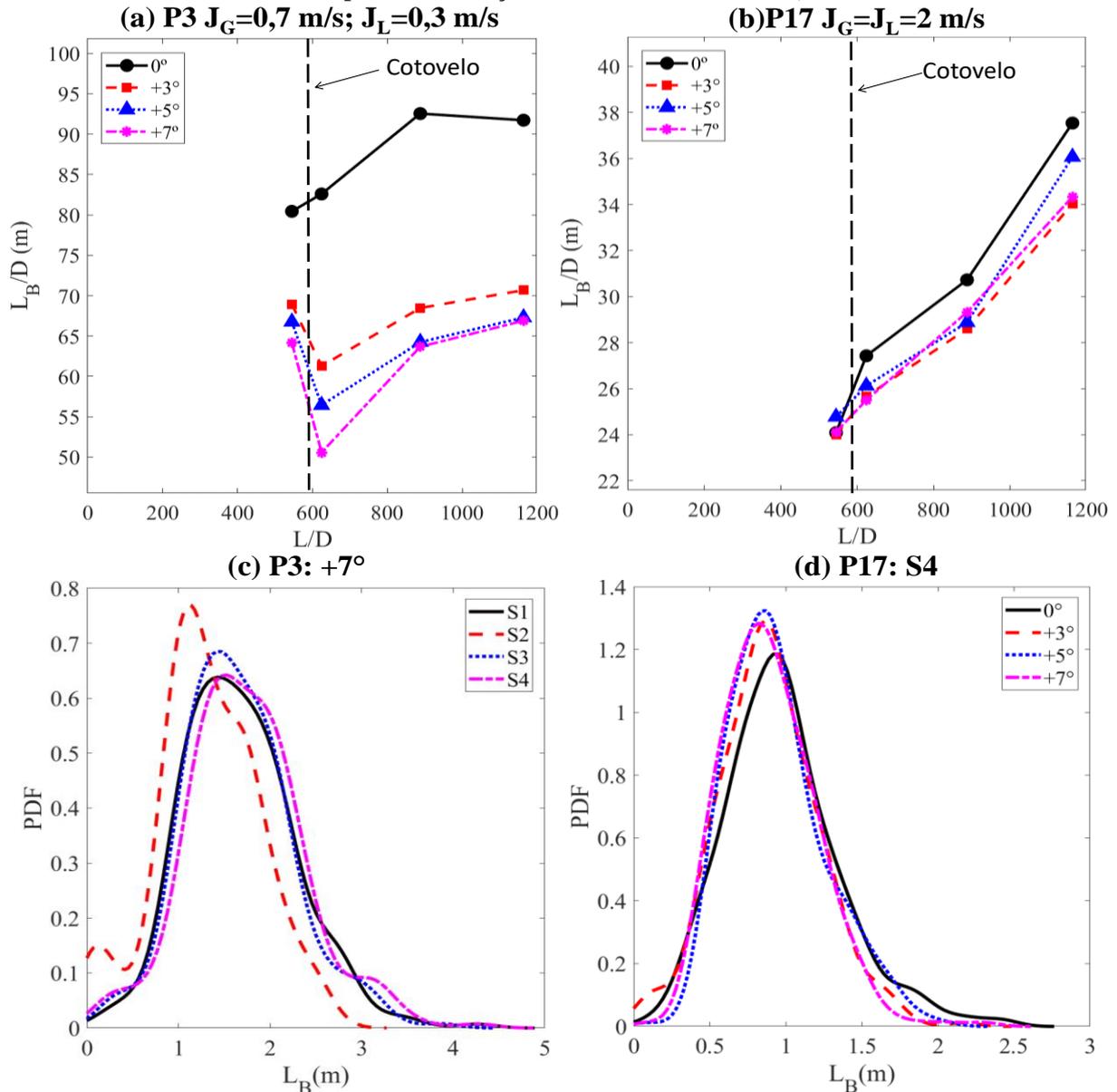
A evolução do comprimento da bolha para os pontos P3 ( $J_G=0,7$  m/s;  $J_L=0,3$  m/s) e P17 ( $J_G=J_L=2$  m/s) está representada nas Figuras 49 (a) e (b), respectivamente. Observa-se na Figura 49 (a), no caso horizontal que o  $L_B/D$  tende a aumentar até a terceira estação (S3) pela coalescência das bolhas e tende a manter-se em um patamar no fim da tubulação, devida a baixa queda de pressão que não expande tanto a bolha. Nos casos ascendentes, as bolhas são quebradas na região do cotovelo, havendo assim uma queda abrupta no  $L_B/D$  devido a formação de um novo pistão, outrora observado por Al-Safran et al. (2000) e foi mostrado no Vídeo 05 e na Figura 45 (b). Na região inclinada, o  $L_B/D$  tende a aumentar novamente pois, algumas bolhas que foram quebradas coalescem ao longo da tubulação, por não serem estáveis, mas o  $L_B/D$  na última estação (S4) volta a ser próximo ao valor antes do cotovelo, como uma espécie de “recuperação” do escoamento em golfadas como era antes do cotovelo.

A Figura 49 (b) expõe o  $L_B/D$  para o ponto P17 ( $J=4$  m/s), onde para o caso horizontal apresenta um crescimento até o fim da tubulação, justamente por possuir uma alta queda de pressão devido a turbulência do escoamento que provoca uma maior expansão da bolha. Neste caso, a presença do cotovelo não provoca mudanças na característica da evolução. Contudo, a região inclinada faz com que o  $L_B/D$  seja levemente menor que o horizontal.

A Figura 49 (c) mostra as curvas de distribuição do  $L_B$  referentes às quatro estações na inclinação  $+7^\circ$  do ponto P3. Observa-se principalmente o deslocamento para a esquerda na

estação S2, devido as quebras das bolhas provocadas pelo cotovelo. Nas outras estações, observa-se uma recuperação dos valores, pois as curvas tendem a ficar próximas da curva da estação S1.

**Figura 49 - Evolução do  $L_B/D$  nas inclinações  $0^\circ$ ,  $+3^\circ$ ,  $+5^\circ$ ,  $+7^\circ$  para os pontos (a) P3 e (b) P17; Distribuições de  $L_B$  (c) do ponto P3 ao longo da tubulação na inclinação  $+7^\circ$  e (d) do ponto P17 na estação S4 para as inclinações ascendentes e horizontal,**



A Figura 49 (d) exprime as distribuições do  $L_B$  do ponto P17, na estação S4 para as inclinações ascendentes e a horizontal. Neste caso, percebe-se que a inclinação ascendente não exerce influência no  $L_B$ , uma vez que as curvas estão praticamente sobrepostas, salvo o pico da curva que está levemente deslocado para a esquerda.

#### 4.3.4 Comprimento do Pistão

Segundo Taitel (1987) e Scott e Kouba (1990), o comprimento do pistão tende a ser maior no escoamento ascendente do que no horizontal, pelo menos para baixas vazões. Isto pois, o líquido por ser uma fase mais densa tende a ir direção contrária ao escoamento, quando as forças de atrito são superadas pelas forças gravitacionais no escoamento ascendente, como relatado por Mukherjee e Brill (1983). Desta forma, o filme de líquido escoando contrário ao escoamento, acumula-se no pistão subsequente, aumentando seu comprimento gradualmente.

Outro fator que propicia o aumento dos pistões é o fato de que o comprimento da bolha tende a ser menor na região ascendente, como discutido na Subseção acima. Um comprimento da bolha menor gera uma região de filme menor, portanto para ter uma conservação da massa, o líquido que outrora ocupava a região do filme tende a ir para o pistão subsequente, incrementando-o.

As Figuras 50 (a) e (b) expõem a evolução do  $L_S/D$  em todas as inclinações ascendentes e o caso horizontal para os pontos P1 ( $J_L=0,7$  m/s;  $J_G=0,3$  m/s) e P8 ( $J_L=J_G=1$  m/s), respectivamente. Na Figura 50 (a), observa-se que, para esse par de velocidades, o  $L_S/D$  tende a aumentar ao longo da tubulação. Porém, para os casos inclinados, percebe-se que na região do cotovelo ocorre um salto nos valores médios do  $L_S/D$ , tal efeito decorre, justamente, do acúmulo de líquido nessa região, pois como salientaram Taitel e Barnea (2000), se não houver a geração de um novo pistão, o acúmulo no cotovelo faz com que aumente o comprimento do pistão. Após o cotovelo, o  $L_S/D$  continua crescendo até o fim da tubulação, devido à constante perda de líquido da região do filme para o pistão, diferentemente do caso horizontal que parece tender a um patamar.

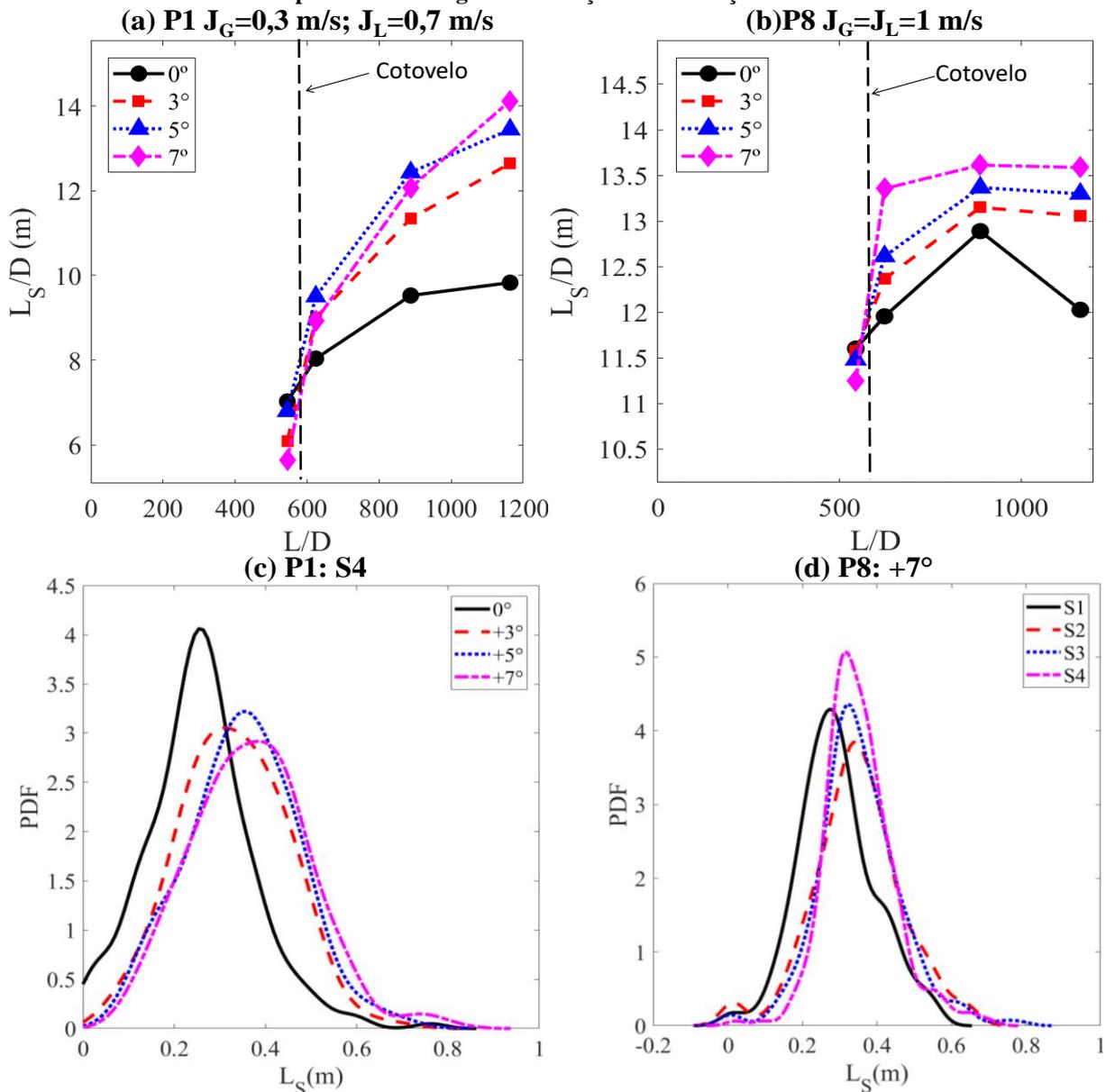
Na Figura 50 (b) também se observa que o  $L_S/D$  tende a ser maior na presença da inclinação ascendente do que em comparação com o horizontal. Repara-se também que o aumento do  $L_S$  é maior entre a estação antes do cotovelo e depois, do que entre as outras estações ao longo da região inclinada.

Além disso, comparando-se a evolução até o fim do escoamento, percebe-se que, para o  $0^\circ$ , o  $L_S/D$  tende a aumentar até a terceira estação (S3) e depois disso, existe um decaimento. Este fenômeno ocorre devido à diminuição da taxa coalescência das bolhas no fim do escoamento, havendo somente a expansão delas, uma vez que, o primeiro provoca extinção de pistões, fazendo com que o líquido de um pistão migre para outro e o segundo aumenta a região de filme, extraindo líquido do pistão, diminuindo-o. Porém, para os casos ascendentes, por

normalmente haver quebras de bolhas no cotovelo, algumas bolhas voltam a coalescer e o decaimento do pistão não se torna tão pronunciado como no caso horizontal.

A Figura 50 (c) mostra as distribuições de  $L_S$  do ponto P1 na estação S4 para as quatro inclinações. Observa-se o aumento do  $L_S$  com o aumento da inclinação devido ao deslocamento das curvas para a direita. Mas este deslocamento é mais considerável entre o caso horizontal e o  $+3^\circ$ . Entre as inclinações ascendentes, também se observa o aumento, porém de forma mais suave.

**Figura 50 - Evolução do  $L_S/D$  nas inclinações  $0^\circ$ ,  $+3^\circ$ ,  $+5^\circ$ ,  $+7^\circ$  para os pontos (a) P1 e (b) P8; Distribuições de  $L_S$  (c) do ponto P1 na estação S4 para as inclinações ascendentes e horizontal e (d) do ponto P8 ao longo da tubulação na inclinação  $+7^\circ$ .**



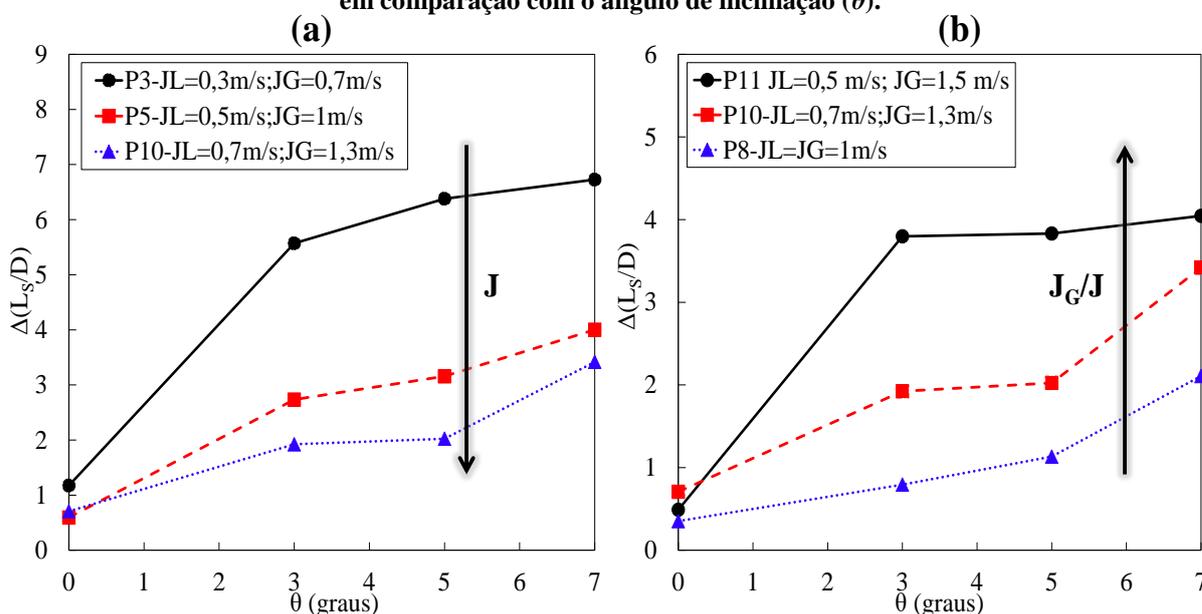
Fonte: autoria própria.

Na Figura 50 (d), observa-se as distribuições de  $L_s$  para o ponto P8 para as quatro estações na inclinação  $+ 7^\circ$ . Pode-se perceber o deslocamento entre as estações S2 e S1 é maior do que entre as outras estações. Isto ocorre devido à presença do cotovelo que faz com que exista um maior acúmulo de líquido nesta região, aumentando o  $L_s$ .

Analisando-se que há uma influência do cotovelo no comprimento dos pistões, comparou-se na Figura 51, a variação do  $L_s/D$  entre as estações S2 e S1 (após e antes o cotovelo, respectivamente) em função do ângulo de inclinação. A Figura 51 (a) mostra três pontos experimentais diferentes, os pontos P3 ( $J=1$  m/s), P5 ( $J=1,5$  m/s) e P10 ( $J=2$  m/s), a qual se observa que a variação é positiva e que tende a aumentar com o ângulo de inclinação, devido ao aumento da inclinação promover um maior acúmulo de líquido na região do cotovelo.

Percebe-se também que a velocidade da mistura ( $J$ ) também gera influência nesta variação. Quanto menor for o  $J$ , mais líquido tende a acumular no cotovelo, por conta dos efeitos gravitacionais influenciarem mais escoamentos com baixas vazões em comparação com os que possuem maiores vazões.

**Figura 51 - Variação do  $L_s/D$  entre as estações S2 e S1 para os pontos (a) P3, P5 e P10 e (b) P8, P10 e P11 em comparação com o ângulo de inclinação ( $\theta$ ).**



Fonte: autoria própria.

A Figura 51 (b) mostra três pontos experimentais que possuem o mesmo  $J=2$  m/s, que seriam os pontos P8, P10 e P11. Mantendo-se constante o  $J$ , notou-se que a variação tende a aumentar com o  $J_G$ . Infere-se que isto ocorre devido a uma presença menor de líquido em relação ao gás que provoca bolhas alongadas maiores, com filmes de líquido maiores. E o acúmulo de líquido ocorre justamente, pela volta do filme de líquido ao encontrar o pistão

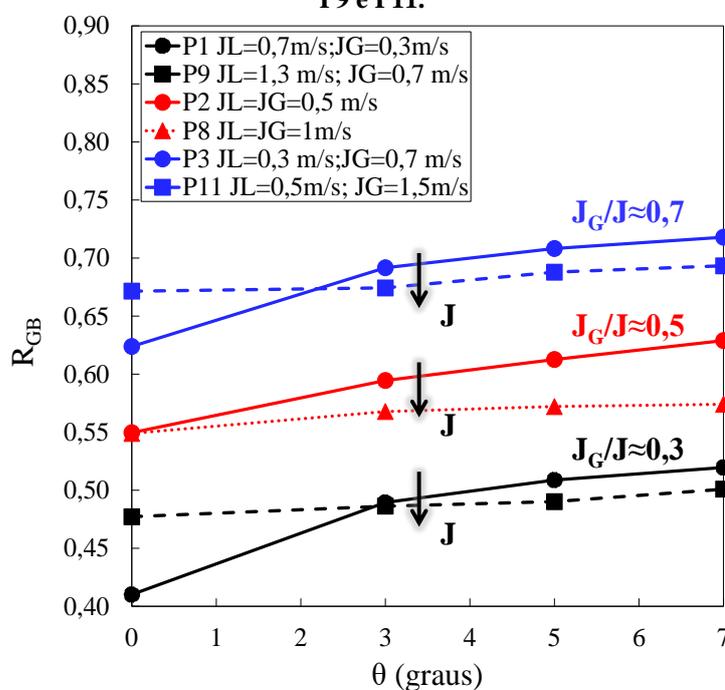
escoando a jusante na região horizontal. Portanto, quanto maior for a proporção de  $J_G$  em relação a  $J$  e maior for o ângulo de inclinação, maior será a variação do  $L_S$  na região cotovelo.

#### 4.3.5 Fração de Vazio na Bolha

A fração de vazio na bolha também é afetada tanto pela região inclinada, quanto pela presença do cotovelo. Observou-se que o  $R_{GB}$  geralmente tende a ser maior em trechos inclinados ascendentes do que em trechos horizontais. Este comportamento ocorre, pois, a bolha alongada no escoamento inclinado ascendente tende a perder a região de salto hidráulico e principalmente a região da cauda, levando a um  $R_{GB}$  médio superior em comparação ao escoamento horizontal. Outro fator que pode influenciar esse aumento é o fato do filme de líquido ir de encontro ao pistão na região ascendente, encolhendo lentamente sua espessura, fazendo com que o gás presente na bolha alongada gradualmente preencha a região do filme.

A Figura 52 apresenta a comparação do  $R_{GB}$  em relação ao ângulo de inclinação na última estação (S4) de medição. O que se observa é um aumento no  $R_{GB}$  conforme aumenta-se o ângulo, devido ao aumento dos efeitos comentados acima.

**Figura 52 -  $R_{GB}$  em função do ângulo de inclinação na última estação (S4) para os pontos P1, P2, P3, P8, P9 e P11.**



Fonte: autoria própria.

Nota-se que o aumento tende a ser influenciado pela proporção de gás na tubulação e pela velocidade da mistura. Na Figura 52, as cores representam os valores de  $J_G/J$  e as linhas e

marcadores representam os valores de  $J$ . Repara-se que, os valores  $R_{GB}$  tendem a se agrupar nos mesmos  $J_G/J$ , ou seja, uma mesma proporção de gás na tubulação em relação à mistura tende a gerar valores de  $R_{GB}$  próximos.

Ao manter-se constante o  $J_G/J$ , percebe-se que, o aumento do  $R_{GB}$  tende a ser maior para menores  $J$ . Isto porque, quanto menor o  $J$ , menores serão as vazões das fases, que sofrem uma maior influência dos efeitos gravitacionais. Sendo maiores estes efeitos, maiores serão as mudanças na bolha alongada devida a inclinação, modificando o  $R_{GB}$ .

Além disto, os pontos com vazões mais baixas perdem mais facilmente a região da cauda, como pode ser visto comparando os Vídeo 10, Vídeo 06 e Vídeo 11 que se referem ao ponto P1, mais especificamente a região horizontal, do cotovelo e da região inclinada, respectivamente. No Vídeo 10, observa-se a presença de uma extensa cauda na bolha alongada, que diminui o  $R_{GB}$  médio da bolha. No Vídeo 06, vê-se a quebra dessa cauda na região do cotovelo devido a retorno do filme de líquido. Essa mesma bolha continua escoando na região ascendente, mas sem a presença da cauda extensa, como mostra o Vídeo 11, fazendo com que o  $R_{GB}$  médio aumente.

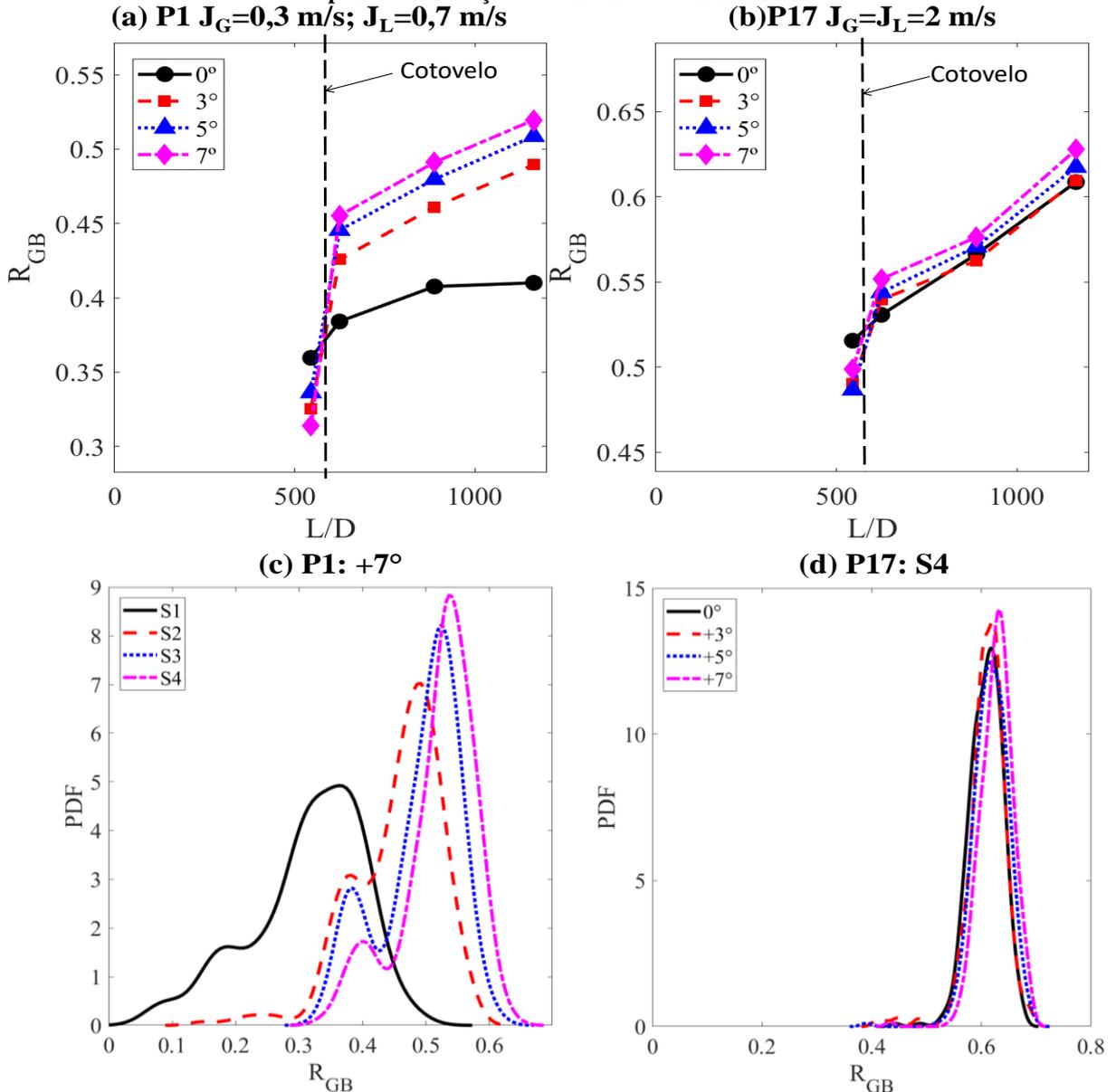
As Figuras 53 (a) e (b) mostram a evolução do  $R_{GB}$  para os pontos P1 ( $J_L=0,7$  m/s;  $J_G=0,3$  m/s) e P17 ( $J_L=J_G=2$  m/s), respectivamente, nas inclinações ascendentes e o caso horizontal. Enquanto que as Figuras 53 (c) e (d) expõem as distribuições do ponto P1 ao longo da tubulação para inclinação  $+7^\circ$  e do ponto P17 na última estação (S4) para as inclinações ascendentes e horizontal.

Na Figura 53 (a), observa-se que para o caso horizontal, o  $R_{GB}$  tende a aumentar até a terceira estação (S3) e alcança um patamar na última estação (S4), isto devido à queda de pressão que é baixa no fim da tubulação, não expandindo tanto a bolha alongada. Nos casos ascendentes, percebe-se que há um salto no valor do  $R_{GB}$  médio na região do cotovelo devido à perda da cauda, principalmente. Ao longo da tubulação, na região ascendente, o  $R_{GB}$  continua aumentando gradualmente até o final da tubulação, devido à diminuição da espessura do filme e a maior expansão do gás causada pela maior queda de pressão. Este mesmo comportamento também pode ser observado na Figura 53 (c), onde para o caso  $+7^\circ$ , percebe-se que há um maior deslocamento entre as estações S1 e S2 do que entre as estações S2 e S3, por exemplo, ratificando o que é observado nos valores médios.

A Figura 53 (b) expõe a evolução do ponto P17, cuja velocidade de mistura é igual a  $J=4$  m/s e observa-se que há uma certa influência do cotovelo e da região ascendente no  $R_{GB}$ . Porém, esse efeito quase não é percebido na inclinação de  $+3^\circ$  e para as outras inclinações, observa-se uma diferença um pouco maior, mas ainda sem muita relevância, pois para esse par

de vazões, os efeitos gravitacionais são inferiores aos efeitos inerciais. Isto pode ser corroborado pela Figura 53 (d), que traz as distribuições na mesma estação S4, variando as inclinações, onde pode-se observar que as curvas para o horizontal e o  $+3^\circ$  estão praticamente sobrepostas. Para as outras duas inclinações vê-se um deslocamento pouco significativo.

**Figura 53 - Evolução do  $R_{GB}$  nas inclinações  $0^\circ$ ,  $+3^\circ$ ,  $+5^\circ$ ,  $+7^\circ$  para os pontos (a) P1 e (b) P17; Distribuições de  $R_{GB}$  (c) do ponto P1 na inclinação  $+7^\circ$  ao longo da tubulação e (d) do ponto P17 na estação 4 para as inclinações ascendentes e a horizontal.**



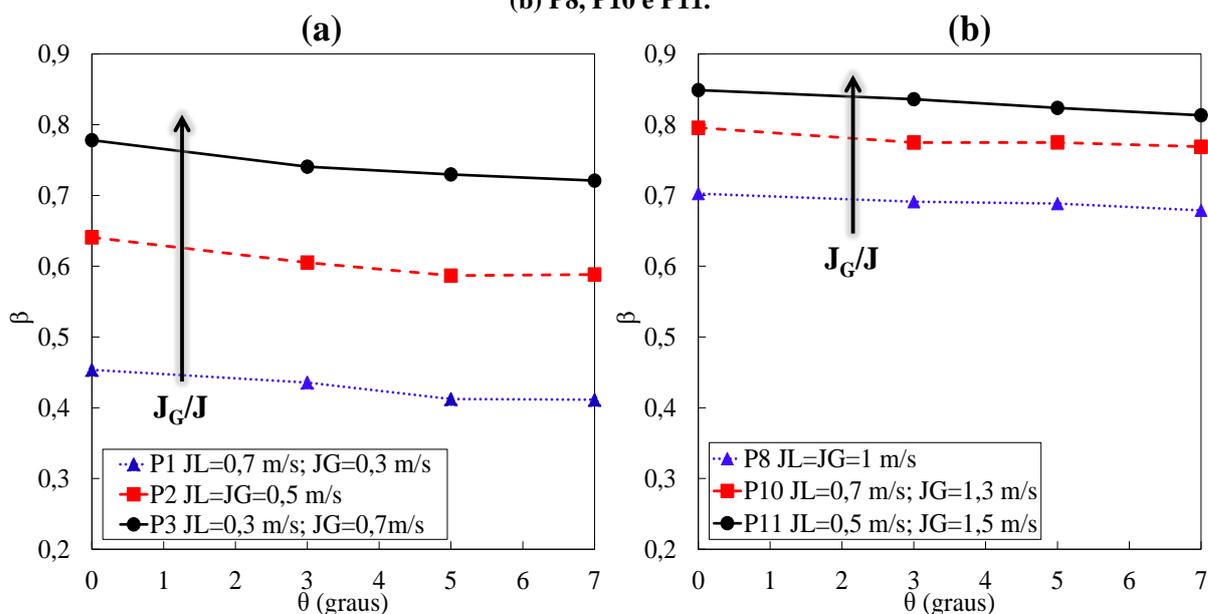
Fonte: autoria própria.

#### 4.3.6 Fator de Intermitência

O fator de intermitência, por ser uma ponderação do comprimento da bolha na célula unitária, tende a diminuir em regiões inclinadas ascendentes em comparação ao escoamento

horizontal, pois há uma diminuição do comprimento das bolhas, ao mesmo tempo que se aumenta o comprimento dos pistões. Como pode ser observado na Figura 54, o  $\beta$  em comparação com as inclinações tende a diminuir, este efeito foi observado principalmente em pontos com baixas vazões.

**Figura 54 - Fator de intermitência na estação S4 em função da inclinação para os pontos (a) P1, P2 e P3 e (b) P8, P10 e P11.**



Fonte: autoria própria.

A Figura 54 (a) mostra os pontos P1, P2 e P3 que possuem  $J=1$  m/s e como era esperado os valores de  $\beta$  tendem a serem maiores com a maior proporção de gás na tubulação, pois a bolha tende a ser maior e o pistão menor.

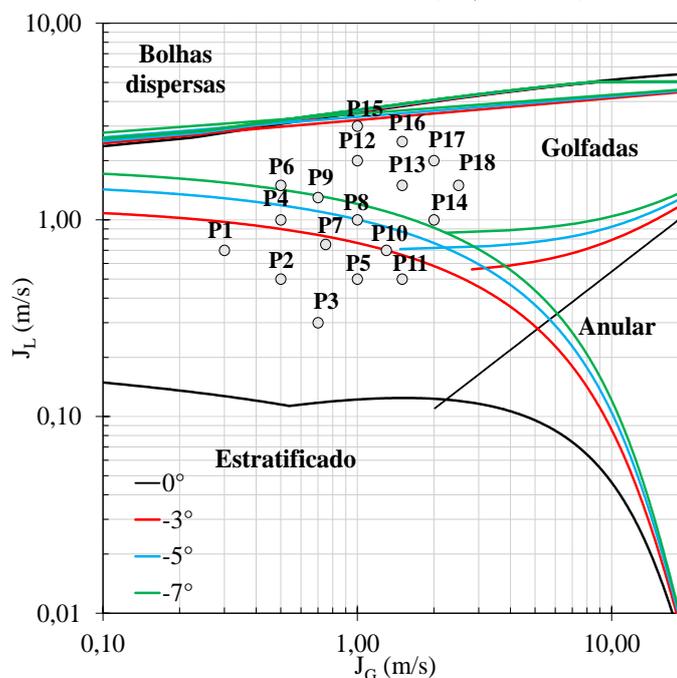
Além disto, observa-se que a diminuição do  $\beta$  em função da inclinação é quase linear, com um coeficiente angular praticamente igual, independentemente do  $J_G/J$ . O mesmo pode ser observado na Figura 54 (b), com os pontos P8, P10 e P11 com  $J=2$  m/s. Neste caso, nota-se o mesmo comportamento de maiores valores de  $\beta$  quando aumenta-se o  $J_G/J$ , bem como a diminuição quase linear quando muda-se a inclinação.

#### 4.4 ESCOAMENTO HORIZONTAL COM LEVE MUDANÇA NA DIREÇÃO DESCENDENTE

O escoamento em golfadas na presença de uma região descendente pode modificar, para baixas vazões, o padrão para o escoamento estratificado como discutido na Seção 2.3, na Página 40. Além disso, como apontaram Schmidt, Brill e Beggs (1980), escoamentos em inclinações negativas e com baixas vazões das fases possuem como força dominante a

gravitacional, sendo o atrito desprezível. A Figura 55 mostra os pontos experimentais no mapa de fluxo baseado no modelo de Taitel e Dukler (1976) para escoamento horizontal e as inclinações descendentes de  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ .

**Figura 55 - Pontos experimentais no mapa de fluxo de Taitel e Dukler (1976) para escoamentos horizontal e inclinados descendentes ( $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ ).**



Fonte: autoria própria.

Observa-se que, na Figura 55, as linhas do escoamento estratificado aumentam com a diminuição da inclinação descendente. Como apontado por Barnea et al. (1980), a presença de tubulações inclinadas descendentes, faz com que o líquido escoe mais rápido dificultando a transição do escoamento estratificado para o padrão golfadas, uma vez que, demanda-se maiores vazões para o filme de líquido tocar a parte superior da tubulação gerando o pistão e, por sua vez, uma golfada.

Analisando os pontos experimentais mostrados na Figura 55, observa-se que alguns pontos, que são golfadas no escoamento horizontal, passam a ser do padrão estratificado no escoamento inclinado descendente. Experimentalmente, foi observado que destes pontos que deveriam ser estratificados, alguns de fato mudaram de padrão conforme a inclinação, porém para outros, a transição acabou não ocorrendo.

A Tabela 3 mostra os pontos experimentais que segundo o mapa de fluxo (M.F.) deveriam ser estratificados em comparação com o observado experimentalmente para as três inclinações descendentes. As marcações em “x” significam escoamento estratificado, as marcações em “-” são para o escoamento em golfadas e a marcação em “o” representa um

padrão de transição observado apenas para o ponto P1 na inclinação  $-7^\circ$ , que será discutido posteriormente.

**Tabela 3 - Pontos em que ocorreram estratificação experimentalmente em comparação com o modelo de mapa de fluxo de Taitel e Dukler (1976).**

$-3^\circ$			$-5^\circ$			$-7^\circ$		
Ponto	M.F.	Exp.	Ponto	M.F.	Exp.	Ponto	M.F.	Exp.
P1	<i>x</i>	<i>x</i>	P1	<i>x</i>	<i>x</i>	P1	<i>x</i>	<i>o</i>
P2	<i>x</i>	<i>x</i>	P2	<i>x</i>	<i>x</i>	P2	<i>x</i>	<i>x</i>
P3	<i>x</i>	<i>x</i>	P3	<i>x</i>	<i>x</i>	P3	<i>x</i>	<i>x</i>
P4	-	-	P4	<i>x</i>	-	P4	<i>x</i>	<i>x</i>
P5	<i>x</i>	-	P5	<i>x</i>	<i>x</i>	P5	<i>x</i>	<i>x</i>
P6	-	-	P6	-	-	P6	-	-
P7	<i>x</i>	-	P7	<i>x</i>	<i>x</i>	P7	<i>x</i>	<i>x</i>
P8	-	-	P8	-	-	P8	<i>x</i>	-
P9	-	-	P9	-	-	P9	-	-
P10	-	-	P10	<i>x</i>	-	P10	<i>x</i>	-
P11	<i>x</i>	-	P11	<i>x</i>	-	P11	<i>x</i>	-

Fonte: autoria própria.

Isto posto, avaliando-se a Tabela 3 percebe-se uma diferença na previsão do modelo de Taitel e Dukler (1976) em relação ao que foi observado experimentalmente pois, como apontado por Alves et al. (2019), o modelo considera na entrada um escoamento estratificado que a partir das instabilidades de K-H provoca o escoamento em golfadas. Neste trabalho, antes da região descendente, o padrão é o tipo golfadas, desta forma a entrada difere da entrada avaliada no modelo, gerando uma discrepância nos pontos que de fato estratificam. Alves et al. (2019) sugerem que o melhor método de modelar a transição do escoamento em golfadas para o estratificado é utilizando o método de dissipação das golfadas proposto por Taitel, Sarica e Brill (2000).

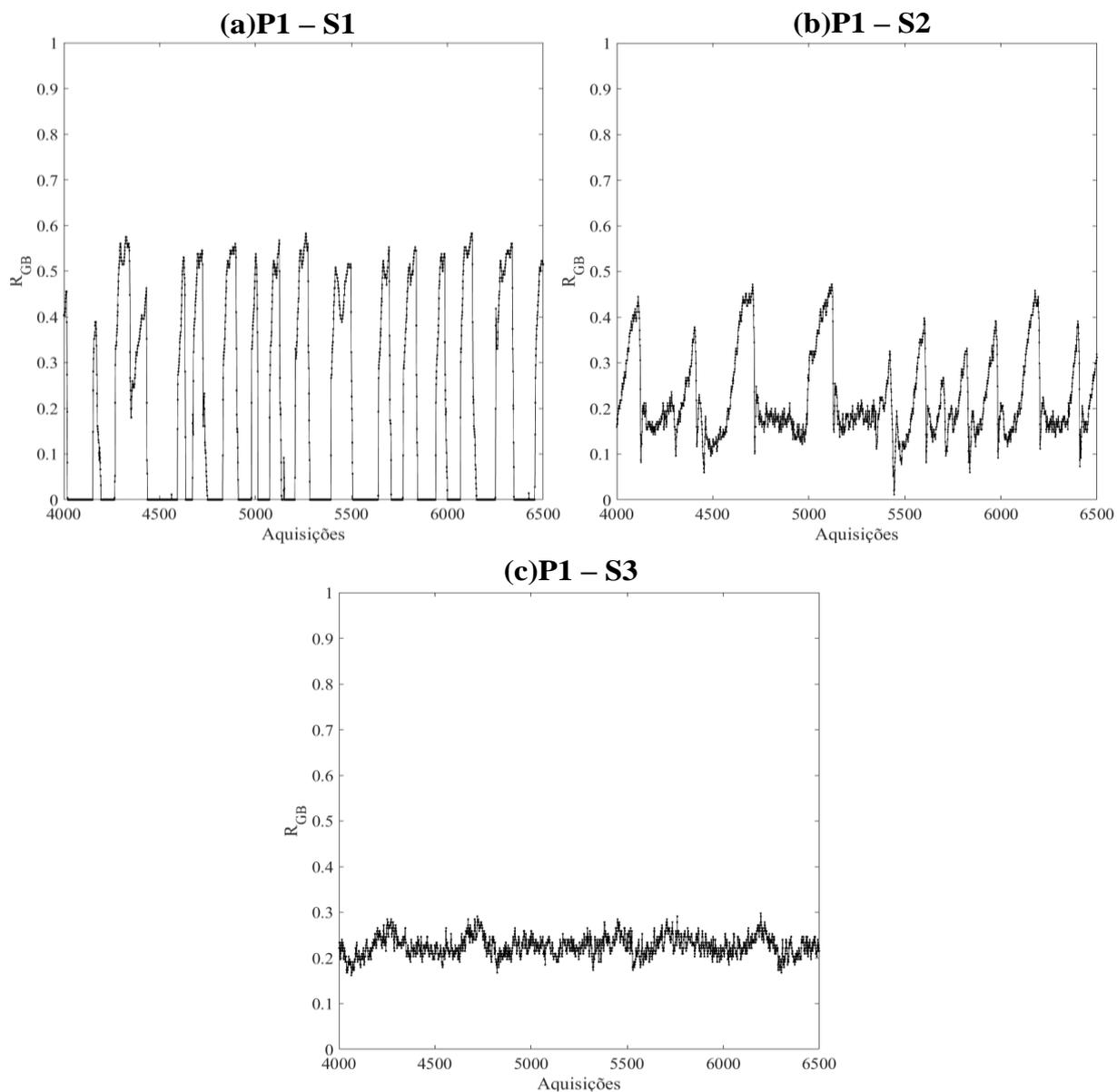
#### 4.4.1 Análise dos Pontos Experimentais que Ocorre Estratificação

O processo de dissipação das golfadas quando passa de uma região horizontal para uma região descendente é provocado pela aceleração do filme de líquido devido as forças gravitacionais. A dissipação dessas golfadas faz com que as bolhas coalesçam, e para alguns casos se essa dissipação for sucessiva, forma um escoamento estratificado, como comentado na Seção 2.3, página 38.

Contudo, antes de estratificar, observam-se mudanças significativas nos parâmetros característicos do escoamento em golfadas. A Figura 56 mostra os sinais de  $R_{GB}$  obtidos a partir

dos sensores resistivos para o ponto P1 ( $J_L=0,7$  m/s;  $J_G=0,3$  m/s) que estratifica no cenário que há mudança de direção com inclinação de  $-3^\circ$ .

**Figura 56 - Sinais de  $R_{GB}$  do ponto P1 na inclinação  $-3^\circ$  para os estações (a) S1, (b) S2 e (c) S3.**



Na Figura 56 (a), observa-se o sinal da estação S1, disposta antes do cotovelo. O sinal desta estação é característico de um escoamento em golfadas, com diferença nas passagens de uma bolha alongada (pico do sinal) e um pistão de líquido (vale do sinal). Na Figura 56 (b), referente à estação S2, localizada após o cotovelo, observa-se uma mudança na forma do sinal, onde não é possível identificar com clareza as estruturas da célula unitária, caracterizando uma região de transição. Os sinais na região de transição, logo após o cotovelo, tornaram-se bastante complicados para o processamento, de forma que alguns pontos não foram processados.

Por fim, a Figura 56 (c) expõe o sinal da estação S3 na região inclinada, em que se pode observar um sinal característico do escoamento estratificado, pois a fração de vazio mantém-se flutuando em torno de 0,25 por toda a medição. Esse tipo de sinal, por não gerar nenhuma estrutura, não pode ser processado no programa desenvolvido por Vicencio (2013), portanto quando o escoamento estratifica não há valores para os parâmetros característicos do escoamento em golfadas. A diferença entre os escoamentos das Figuras 53 (a) e (c) podem ser observadas nos Vídeo 10 e Vídeo 12.

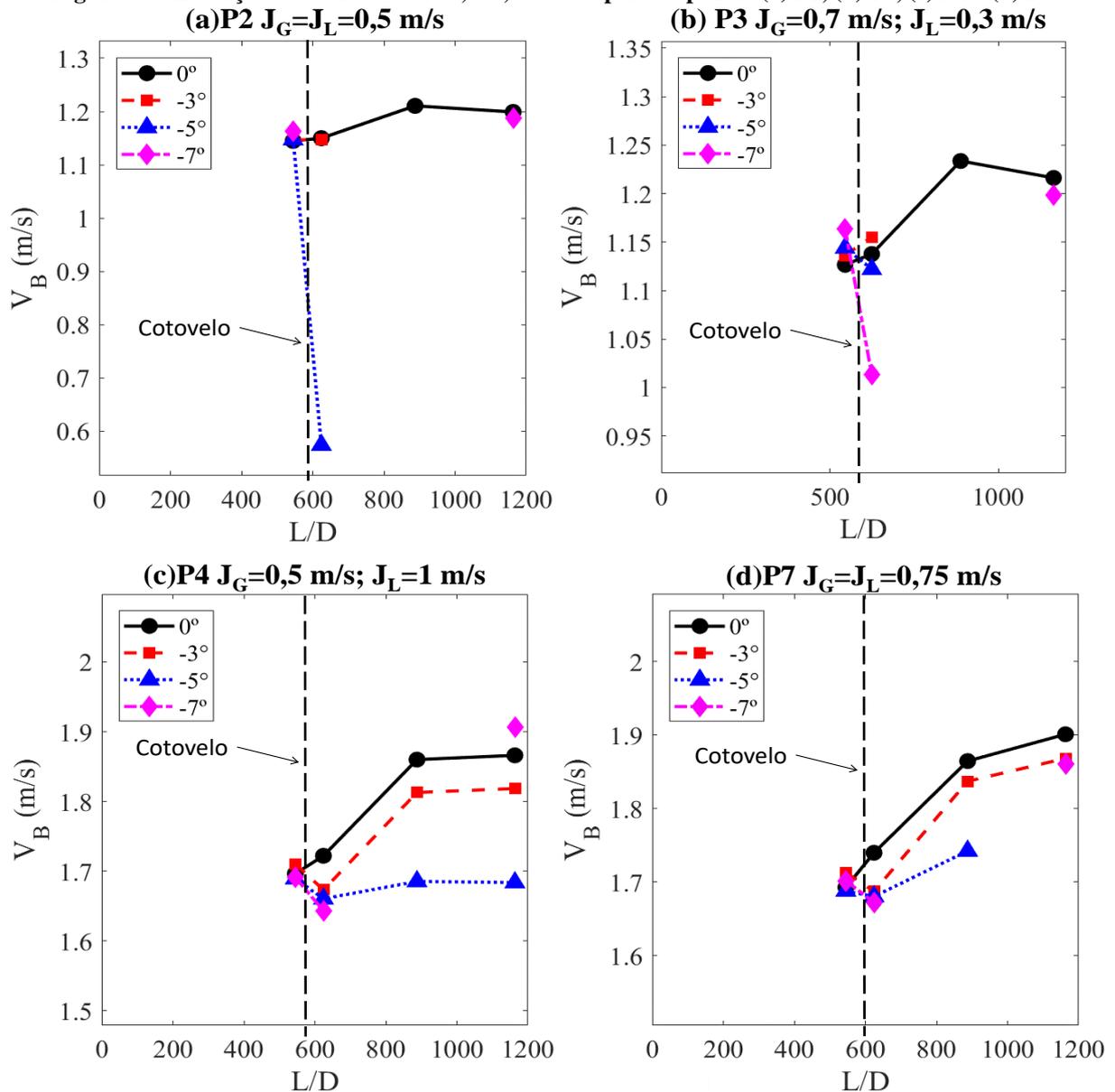
A Figura 57 mostra a evolução do  $V_B$  para quatro pontos experimentais nos casos  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ . Ressalta-se que a estação S4 no cenário de  $-7^\circ$  está em uma seção que teve que voltar a ser horizontal por limitação espacial da bancada experimental.

As Figuras 57 (a) e (b) expressam os pontos P2 ( $J_G=J_L=0,5$  m/s) e P3 ( $J_G=0,7$  m/s;  $J_L=0,3$  m/s), respectivamente, que estratificam nas três inclinações descendentes. Percebeu-se que, normalmente, logo após o cotovelo, antes de estratificar, ocorre uma tendência de diminuição do  $V_B$ , que será melhor explorada à diante. Para estes pares de velocidades, após o cotovelo, a dissipação das golfadas, devido à gravidade acelerar o filme de líquido, retirando mais líquido do pistão, reduzindo-o, provoca a estratificação completa.

Ainda sobre as Figuras 57 (a) e (b), no escoamento do caso  $-7^\circ$ , na última estação (S4) a tubulação volta a ser horizontal, com isso observou-se que o escoamento na região inclinada passa de estratificado novamente para golfada nesta estação. Desta forma, a última estação (S4) volta a ter valores e o que se percebe é que, os valores tendem a ser próximos da mesma estação do escoamento completamente horizontal. Portanto, existe uma tendência de recuperação nos parâmetros do escoamento em golfadas quando há uma região com uma leve mudança de direção descendente e ela volta a ser horizontal, como se a tubulação continuasse horizontal. E isto ocorre, havendo mudança de padrão ou não na região descendente.

As Figuras 57 (c) e (d) mostram os pontos P4 ( $J_G=0,5$  m/s;  $J_L=1$  m/s) e P7 ( $J_G=J_L=0,75$  m/s) que estratificam em algumas inclinações. O ponto P4 estratifica apenas para a inclinação de  $-7^\circ$  enquanto que, o ponto P7 estratifica apenas na última estação do caso  $-5^\circ$  e para o caso  $-7^\circ$ . Como era esperado, alguns pontos necessitam de uma inclinação menor para que a dissipação das golfadas provoque a estratificação completa, pois para menores inclinações o efeito gravitacional vai vencer os efeitos inerciais que mantinham o escoamento em golfadas nestes pares de vazões.

Figura 57 - Evolução do  $V_B$  nos casos  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$  para os pontos (a) P2, (b) P3, (c) P4 e (d) P7.



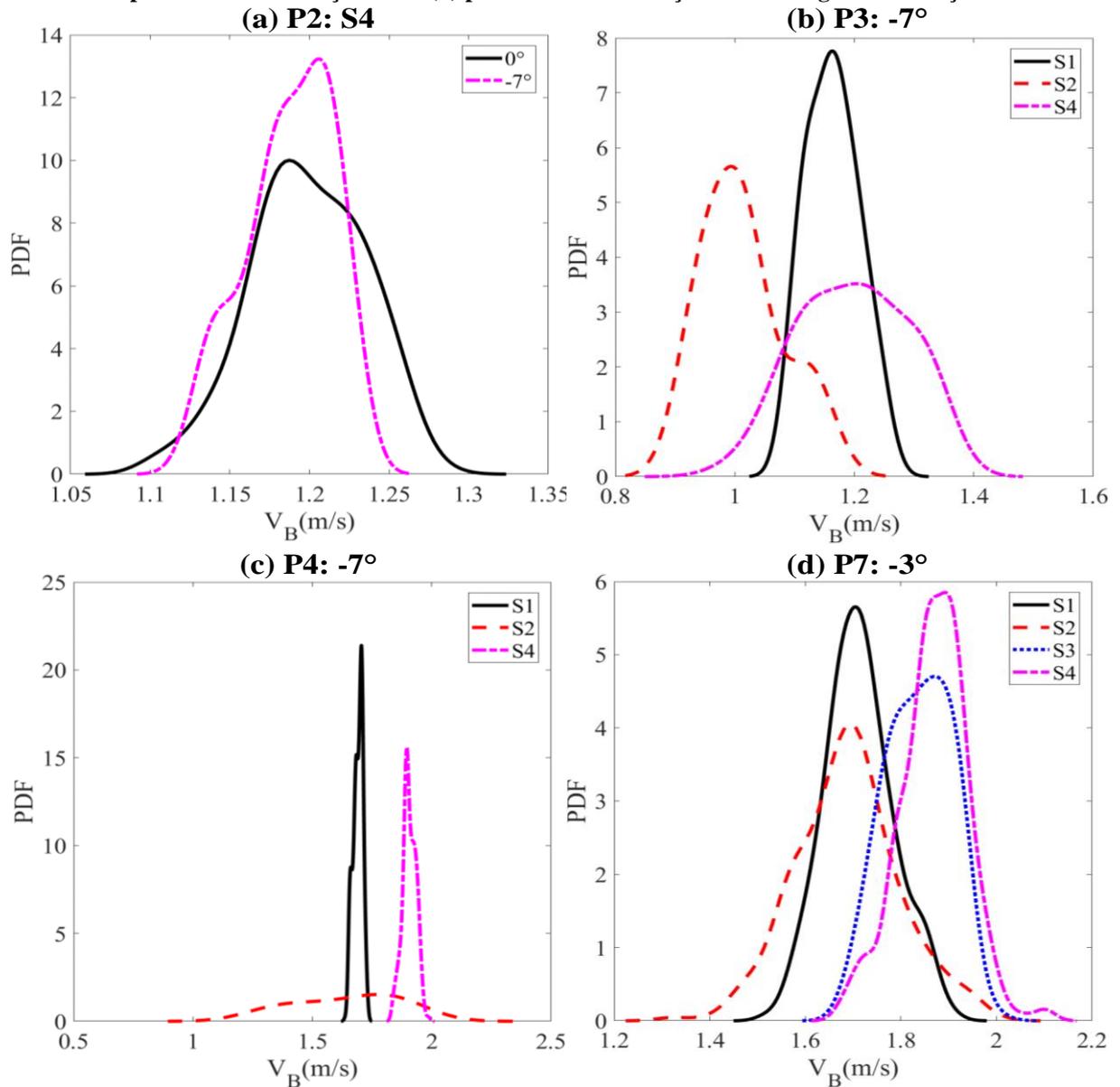
Fonte: autoria própria.

A Figura 58 (a) mostra a comparação entre as distribuições do  $V_B$  na última estação (S4) do escoamento completamente horizontal e o caso  $-7^\circ$ , onde na última estação o escoamento também é horizontal. Observa-se a recuperação dos valores distribuídos, corroborando com o que foi mostrado nos valores médios na Figura 57 (a).

As Figuras 58 (b) e (c) trazem os pontos P3 e P4, respectivamente, no caso  $-7^\circ$  que ocorre estratificação de ambos na terceira estação (S3). No ponto P3, observa-se a tendência da diminuição da velocidade da bolha antes de estratificar, pelo deslocamento da curva da estação S2 para a esquerda. Porém, no ponto P4, nota-se que o que ocorre é um espalhamento dos valores, alcançando valores bem baixos, fazendo com que a média diminua. A Figura 58 (d) expõe a distribuição do  $V_B$  ao longo da tubulação para o ponto P7 na inclinação  $-3^\circ$ , onde já é

possível observar o leve deslocamento da estação S2, indicando que a velocidade tendeu a diminuir.

**Figura 58 - Distribuições de  $V_B$  para (a) o ponto P2 na última estação para  $0^\circ$  e  $-7^\circ$ , (b) o ponto P3 e (c) o ponto P4 na inclinação  $-7^\circ$  e (d) para o P7 na inclinação  $-3^\circ$  ao longo da tubulação.**

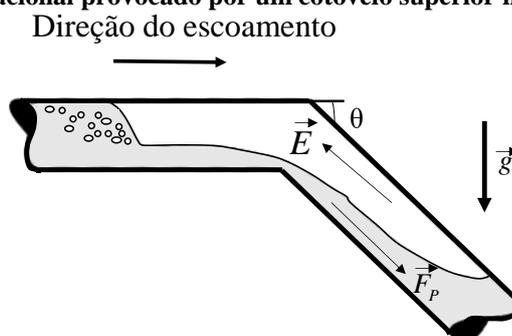


Fonte: autoria própria.

Sobre o decaimento do  $V_B$  exatamente depois do cotovelo inferior, uma explicação para esse fenômeno é que a gravidade agindo no escoamento provoca uma força que é contrária ao movimento da bolha, devido ao empuxo ( $\vec{E}$ ), e a favor do escoamento do líquido por ter uma densidade maior (força peso,  $\vec{F}_p$ ). Este empuxo tende a desacelerar a bolha à medida que acelera o líquido, fazendo com que o  $V_B$  diminua após o cotovelo. A Figura 59 traz uma representação dessa diferença das forças atuando na região da bolha.

Ao longo da tubulação, o  $V_B$  tende a ser sempre menor na região descendente do que em comparação ao horizontal, justamente pela defasagem que o empuxo provoca. Observa-se que para as inclinações de  $-3^\circ$  e  $-5^\circ$  do ponto P4 na Figura 57 (c), por exemplo, que o  $V_B$  tende a aumentar quando fica distante do cotovelo, uma vez que, ao longo da tubulação a velocidade relativa entre as fases aumenta, aumentando o cisalhamento entre elas. O filme de líquido começa então a acelerar a bolha novamente, acelerando-a até que a diferença de velocidades entre as fases seja menor e a velocidade da bolha alcance um patamar. O patamar é alcançado mais rapidamente com a diminuição da inclinação. No caso da última estação (S4) da inclinação  $-7^\circ$ , que se observa escoamento em golfadas novamente, a parcela do empuxo que desacelerava a bolha deixa de existir, a queda de pressão é recuperada e o  $V_B$  volta a ter valores similares ao caso completamente horizontal.

**Figura 59 - Efeito gravitacional provocado por um cotovelo superior no escoamento em golfadas.**



**Fonte: autoria própria.**

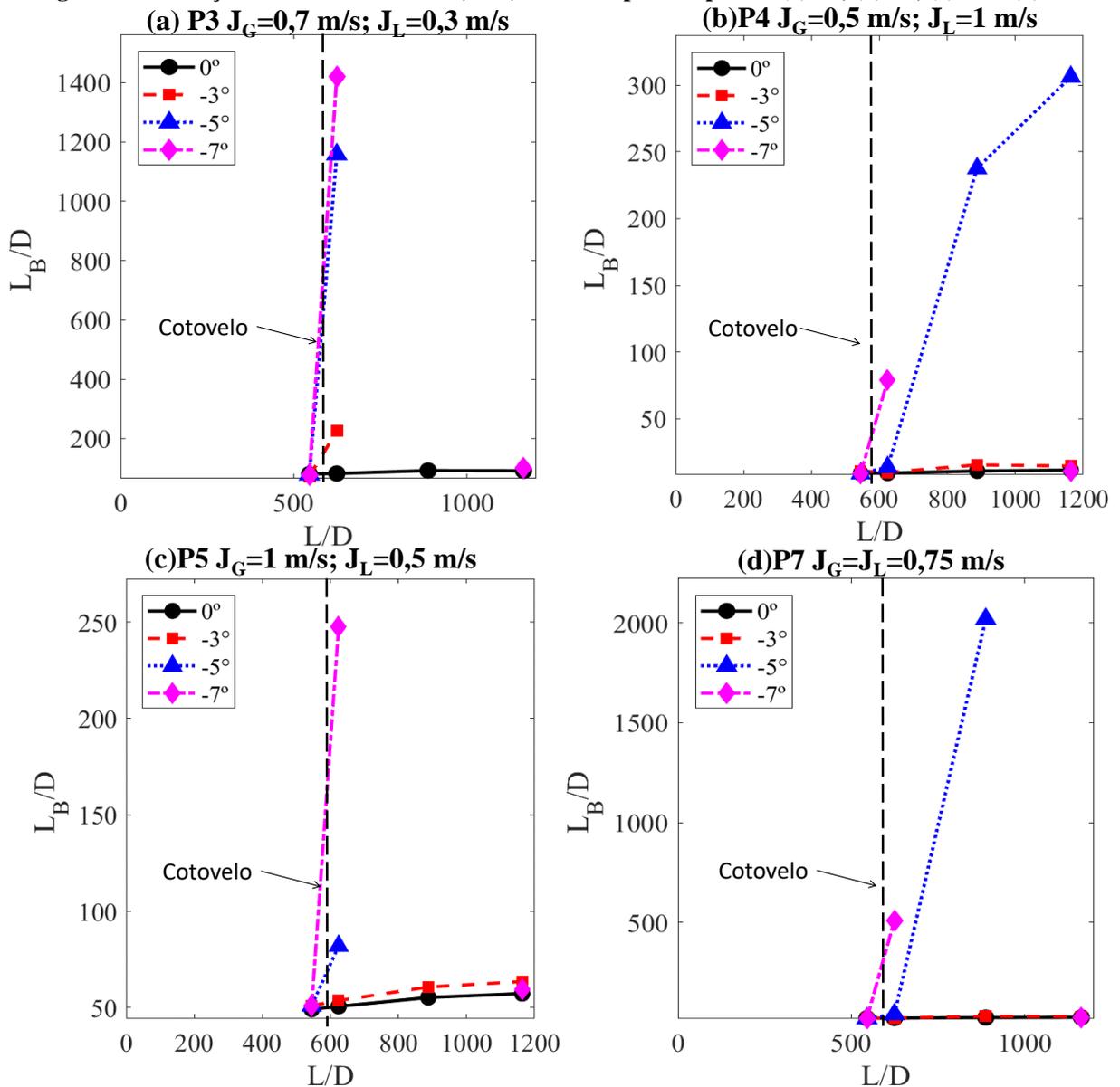
Outro efeito que pode ser considerado para a aceleração da bolha é a expansão causada pela queda de pressão, porém essa queda de pressão tende a diminuir com a inclinação, corroborando para uma menor aceleração ao diminuir-se a inclinação.

A Figura 60 mostra a evolução do  $L_B$  ao longo da tubulação para quatro pontos que estratificaram na região descendente. A Figura 60 (a), referente ao ponto P3, mostra que ocorre a estratificação deste ponto para todas as inclinações descendentes pois, o  $L_B$  tende ao infinito após o cotovelo, gerando um escoamento estratificado em seguida.

As Figuras 60 (b), (c) e (d) trazem os pontos P4, P5 e P7, respectivamente, que não estratificam para o caso  $-3^\circ$ , mas que estratificam para as outras inclinações. O ponto P4 possuía pistões até o fim da tubulação para o caso  $-5^\circ$ , porém observando a tendência de aumento do  $L_B$ , pode-se afirmar que se houvesse um maior comprimento de tubulação, aconteceria a transição do escoamento em golfadas para o estratificado. Considerando assim, o modelo de Taitel e Dukler (1976) acertaria todos os pontos que estratificaram no escoamento de  $-5^\circ$ .

O ponto P7 não estratifica na inclinação  $-3^\circ$ , além do que quase não é afetado por ela. No caso de  $-5^\circ$ , a estratificação ocorre apenas na estação S4. Enquanto que para o caso  $-7^\circ$ , a estratificação ocorre logo após a segunda estação (S2). Os Vídeos 13, Vídeo 14 e Vídeo 15 mostram o ponto P7 para os casos de  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ , respectivamente, entre as estações S2 e S3, onde pode-se observar que a estratificação é mais propícia com a diminuição da inclinação. O que é esperado, visto que, com a diminuição da inclinação maior será o processo de dissipação das golfadas.

Figura 60- Evolução do  $L_B/D$  nos casos  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$  para os pontos (a) P3, (b) P4, (c) P5 e (d) P7.



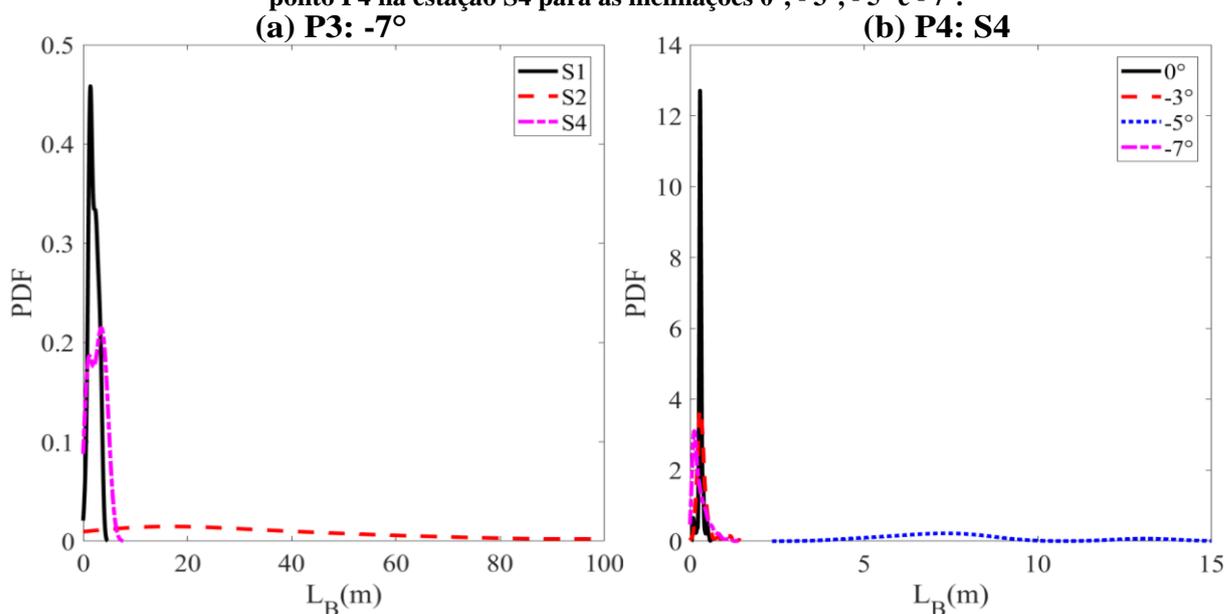
Além disso, observa-se na Figura 60 que, na última estação (S4) da inclinação  $-7^\circ$ , também há a recuperação dos valores do  $L_B$  devido à região horizontal. Isso porque o

escoamento, outrora estratificado, desestabiliza-se pelas instabilidades de K-H, gerando as células unitárias com bolhas semelhantes à última estação do escoamento completamente horizontal.

As Figuras 61 (a) e (b) mostram as distribuições respectivamente para os pontos P3, ao longo da tubulação na inclinação  $-7^\circ$ , e P4 na estação S4 para as inclinações  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ . No ponto P3, pode-se observar na estação S2 a dispersão dos valores que ocorre devido ao processo de dissipação. Os valores dos comprimentos das bolhas são da ordem de dezenas de metros, ou seja, praticamente um escoamento estratificado, que posteriormente é concretizado.

Em relação ao ponto P4, variou-se a inclinação para a mesma estação de medição (S4). Desta forma pode-se confirmar o que foi anteriormente discutido, que para a última estação da inclinação  $-5^\circ$  o escoamento está mudando para o estratificado, uma vez que, os valores de  $L_B$  possuem a mesma dispersão encontrada em pontos onde a estratificação de fato ocorreu.

**Figura 61 – Distribuições de  $L_B$  (a) para o ponto P3 ao longo da tubulação na inclinação  $-7^\circ$  e (b) para o ponto P4 na estação S4 para as inclinações  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ .**

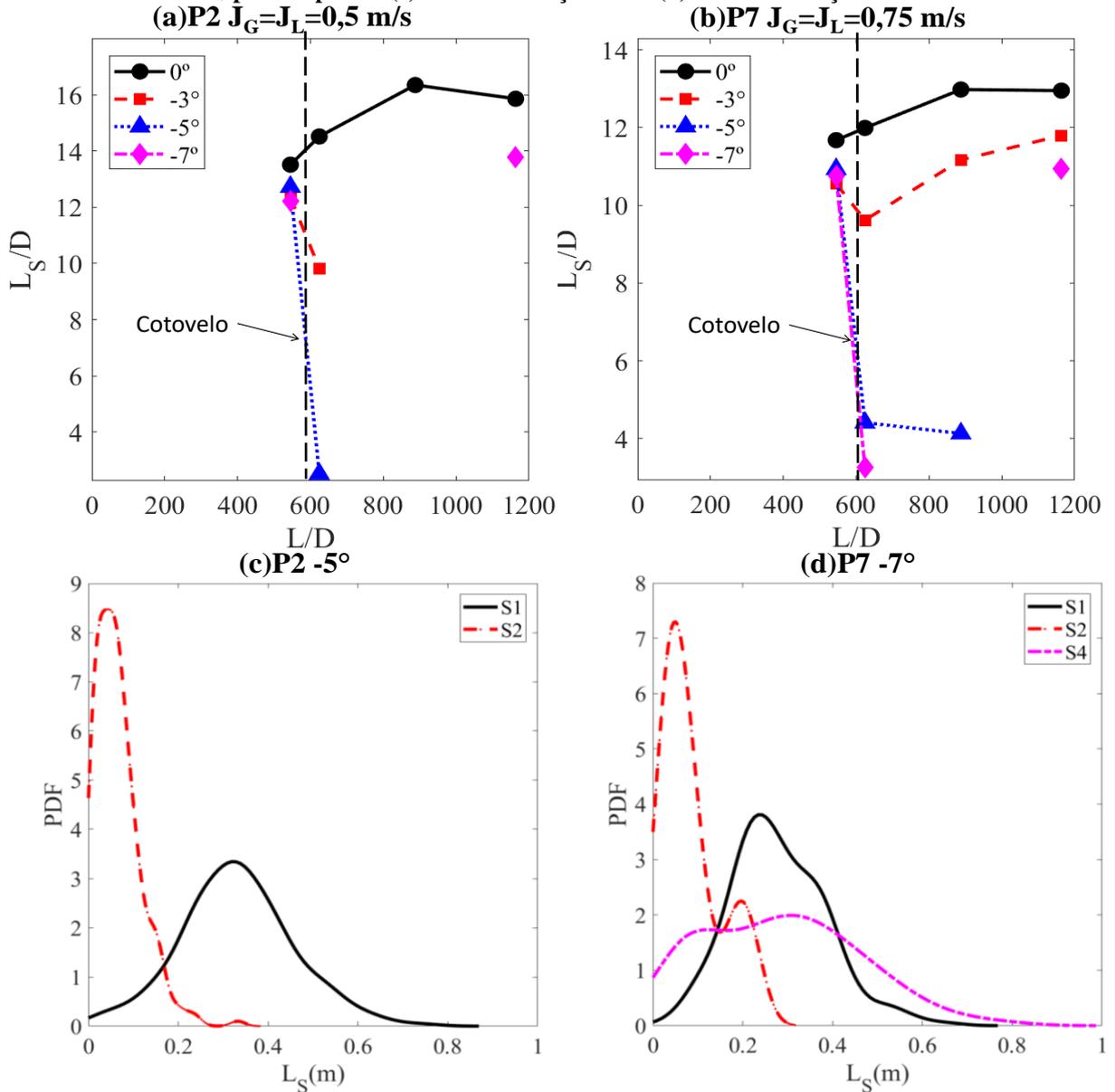


Fonte: autoria própria.

O comprimento dos pistões também é afetado pelo cotovelo exatamente antes de ocorrer a estratificação. As Figuras 62 (a) e (b) exibem a evolução do  $L_S$  ao longo da tubulação para os casos  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$  dos pontos P2 e P7, respectivamente. Em geral, após o cotovelo superior, o  $L_S$  tende a diminuir, como apontaram Scott e Kouba (1990) e Zheng, Brill e Taitel (1994), por conta da dissipação das golfadas. O líquido do filme escoá mais rápido, retirando líquido do pistão, reduzindo-o até que a bolha coalesce. A sucessão da dissipação provoca a estratificação. O ponto P2, na Figura 62 (a), sofre justamente a sucessão de dissipação das

golfadas para as três inclinações descendentes. A Figura 62 (c) mostra a distribuição o ponto P2 na inclinação  $-5^\circ$ , onde pode-se observar que a curva da estação S2 desloca-se para a esquerda, corroborando com a diminuição do comprimento do pistão antes da estratificação.

**Figura 62 - Evolução do  $L_S/D$  nos casos  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$  para os pontos (a) P2 e (b) P7; Distribuições de  $L_S$  para os pontos (c) P2 na inclinação  $-5^\circ$  e (d) P7 na inclinação  $-7^\circ$ .**



Fonte: autoria própria.

O ponto P7 na inclinação  $-3^\circ$ , na Figura 62 (b), possui o decaimento do  $L_S$  na estação S2, significando que houve dissipação de alguns pistões, mas que não foi suficiente para mudar o padrão. Ao longo da tubulação, as forças que provocam a dissipação provavelmente se cancelaram e o comportamento da evolução segue a tendência do escoamento horizontal. Na inclinação de  $-5^\circ$ , o  $L_S$  apresenta um decaimento muito maior após o cotovelo

do que no caso - 3°. Apesar de ter um decaimento mais suave entre as estações S2 e S3, antes de chegar à estação S4, o escoamento estratifica totalmente. Para o caso - 7°, a diminuição do  $L_S$  é ainda mais intensa e nesse caso rapidamente o escoamento muda de padrão. Vale ressaltar também que na estação S4 do escoamento em - 7°, também há uma recuperação do  $L_S$ , porém não tão próxima do escoamento horizontal quanto os outros dois parâmetros discutidos anteriormente.

A diminuição do  $L_S$  na estação S2 em relação a estação S1 na inclinação - 7° também pode ser observada na Figura 62 (d), onde a curva da distribuição é deslocada para a esquerda. Também se pode notar que na estação S4 os valores tendem a aumentarem, ratificando a recuperação do  $L_S$  na horizontal.

Outra análise que pode ser feita para identificar a transição entre o padrão em golfadas e o estratificado é através do fator de intermitência ( $\beta$ ). Por definição, para o padrão golfadas, o  $\beta$  deve assumir valores entre 0 e 1. Se os valores forem iguais a 1 ou muito próximos a esse valor, deve haver uma transição para o padrão anular ou o estratificado, pois não existe mais pistões de líquido na tubulação. Sendo assim, a Figura 63 apresenta a evolução do  $\beta$  ao longo da tubulação para quatro pontos nos casos horizontal e inclinados descendentes.

A Figura 63 (a) traz o ponto P3 que estratifica logo após o cotovelo em todas as inclinações descendentes. Observa-se que na estação S2, antes de estratificar, o  $\beta$  assume valores aproximadamente igual a 1, indicando que praticamente não há parcela do pistão no  $\beta$ .

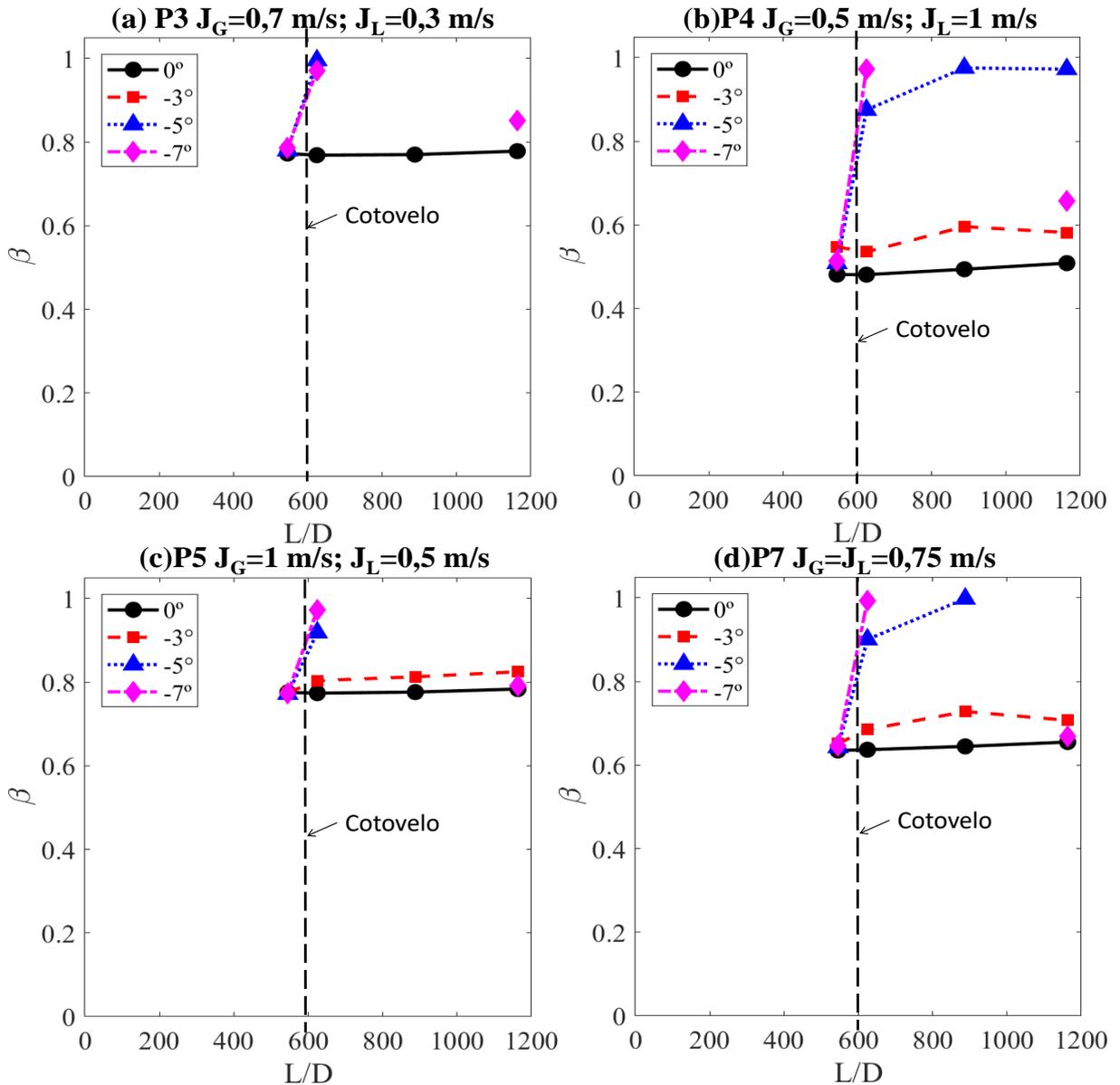
O ponto P4, na Figura 63 (b), não estratifica para a inclinação - 3°, porém, como discutido na evolução do  $L_B$  para a inclinação de - 5°, apesar de ainda haver pistões na tubulação, o valor  $\beta$  apresenta valores que tendem a 1. Desta maneira, corroborando com o que foi apontado anteriormente, este ponto possivelmente estratificaria se houvesse um maior comprimento de tubulação.

A Figura 63 (c) mostra o ponto P5 que também não estratifica na inclinação de - 3°, mas estratifica nas outras duas. Isto pode ser também observado pelos valores  $\beta$ , que tendem a 1 antes da estratificação nas inclinações - 5° e - 7°. A Figura 63 (d), semelhante a anterior, mas na inclinação - 5°, o valor de  $\beta$  só tende a 1 na estação S3 e só após esta estação que ocorre a estratificação.

Ainda com relação ao fator de intermitência, observa-se que mesmo quando não há estratificação, os valores tendem a ser maiores nas regiões descendentes do que em comparação ao horizontal. Isto era esperado, pois, na região descendente, acontece a dissipação das golfadas, gerando menores pistões e coalescência de bolhas, aumentando o fator de intermitência. Além

disso, também se percebe a recuperação dos valores de  $\beta$  na última estação da inclinação  $-7^\circ$ , cuja tubulação é horizontal, concordando com o que já foi visto nos outros parâmetros.

Figura 63 - Evolução do  $\beta$  nos casos  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$  para os pontos (a) P3, (b) P4, (c) P5 e (d) P7.



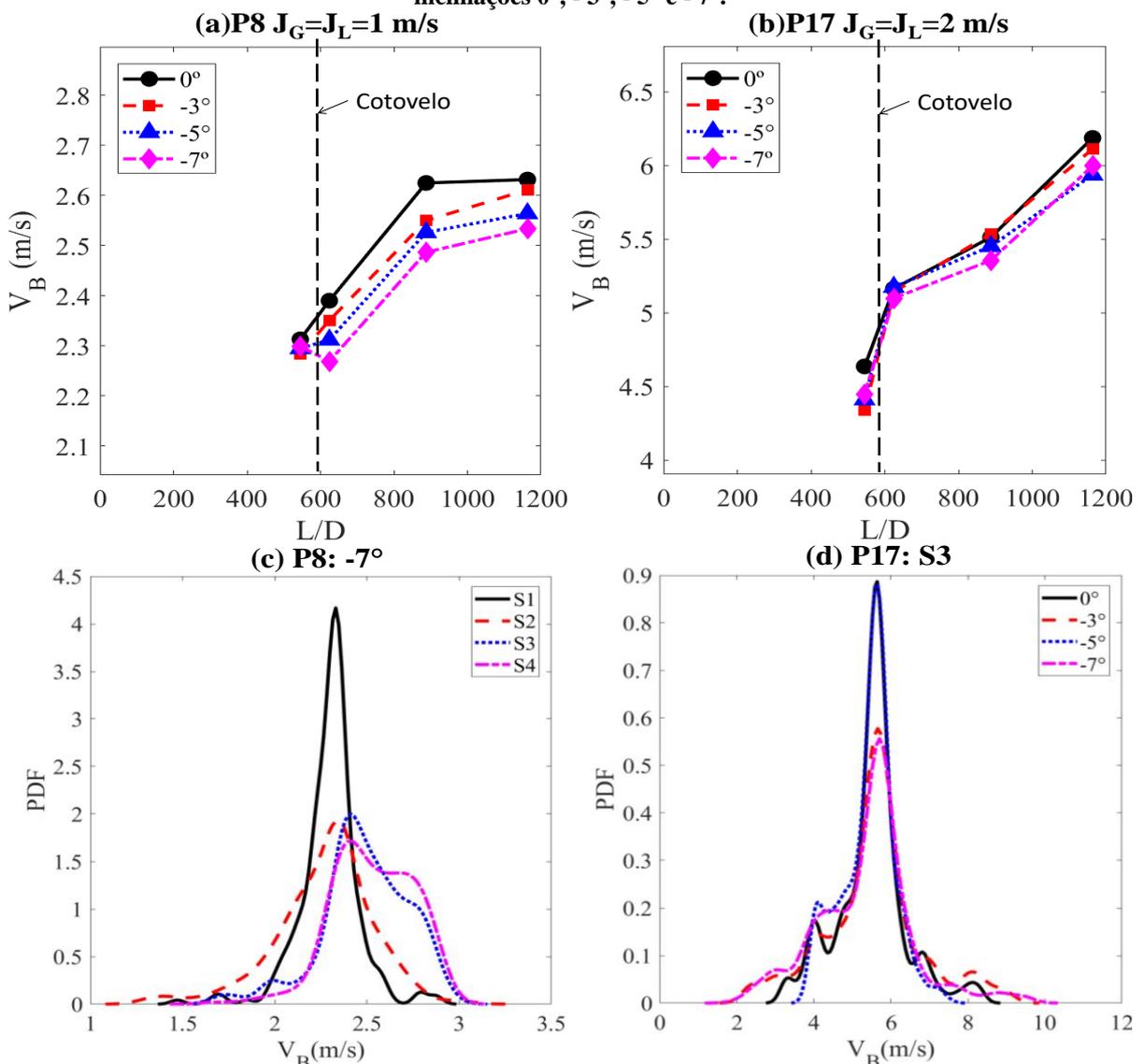
Fonte: autoria própria.

#### 4.4.2 Análise dos Pontos Experimentais que Não Ocorre Estratificação

Em regiões descendentes, após passar por um cotovelo superior, tende-se a ocorrer dissipação das golfadas. Mas estas dissipações podem não ser sucessivas devido aos pares de velocidades superficiais e condições geométricas. Portanto, não necessariamente haverá transição do padrão em golfadas para o estratificado. A Figura 64 mostra a evolução do  $V_B$  para dois casos onde não ocorre a dissipação completa das golfadas, e, conseqüentemente, não há

estratificação. A Figura 64 (a) é referente ao ponto P8 ( $J_G=J_L=1$  m/s) que apesar de manter-se no padrão golfadas, seu  $V_B$  é afetado pela presença do cotovelo superior e a região descendente. Como comentado anteriormente, a bolha alongada ao passar pelo cotovelo começa a ser desacelerada pelo empuxo. Nas inclinações  $-3^\circ$  e  $-5^\circ$ , o empuxo não é suficiente para reduzir o  $V_B$ , porém ele desloca a curva para baixo em relação ao horizontal. Na inclinação  $-7^\circ$ , o empuxo é suficiente para desacelerar a bolha até que ela tenha um decaimento em sua média, mas como visto em outros pontos, ao longo da tubulação o cisalhamento entre o líquido e o gás aumenta, fazendo com que a bolha acelere novamente. O que pode ser também observado na Figura 64 (c), com as distribuições de  $V_B$  ao longo da tubulação para inclinação  $-7^\circ$ , pela presença de valores mais baixos, que fazem diminuir a média.

**Figura 64 - Evolução do  $V_B$  nos casos  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$  para os pontos (a) P8, (b) P17; Distribuições de  $V_B$  (c) do ponto P8 ao longo da tubulação na inclinação  $-7^\circ$  e (d) do ponto P17 da estação s3 para as inclinações  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ .**

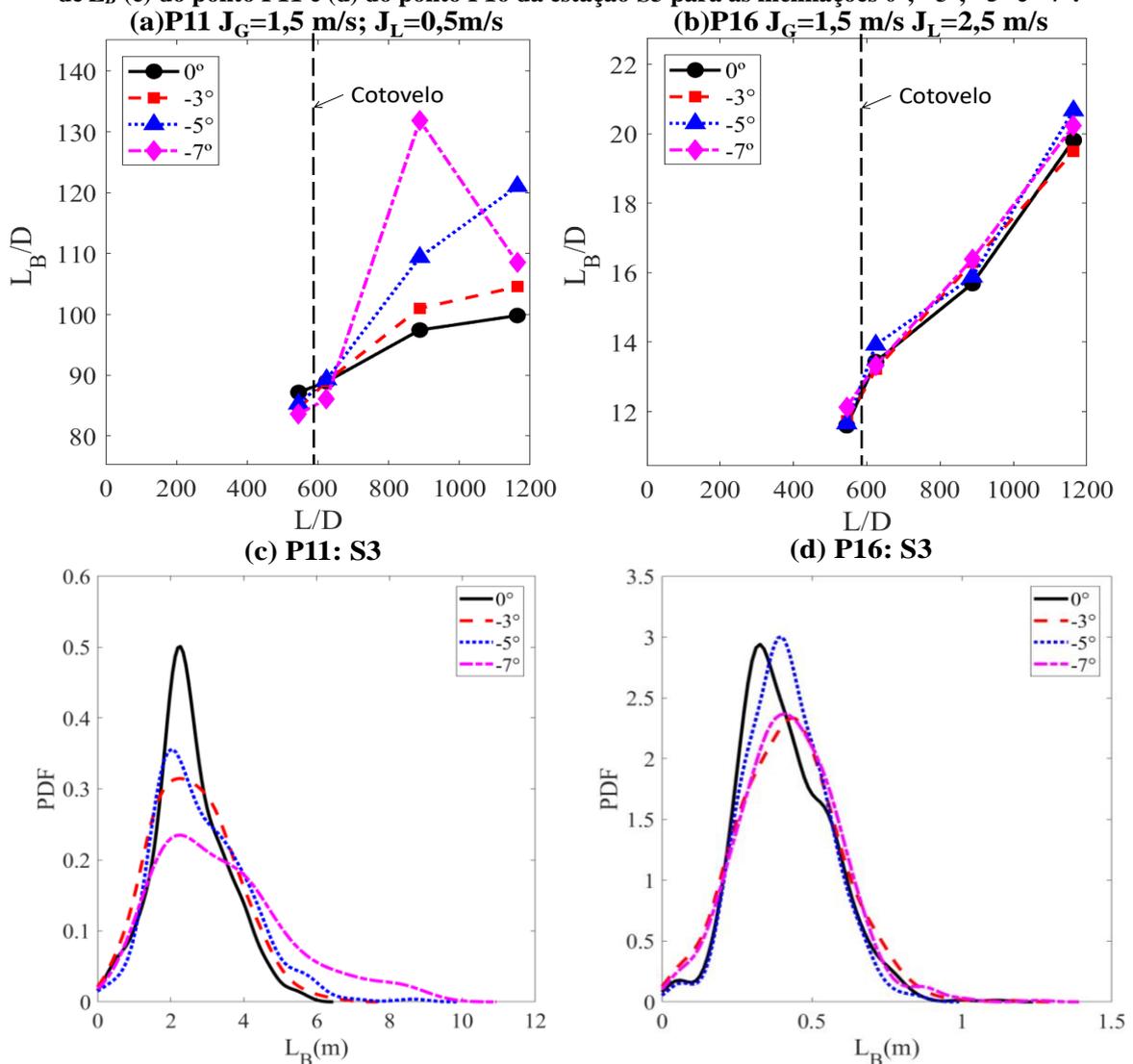


Fonte: autoria própria.

A Figura 64 (b), por sua vez, traz o ponto P17 ( $J_G=J_L=2$  m/s) que não é praticamente afetado pela região descendente nem pelo cotovelo. Isto acontece, pois, as altas vazões das fases fazem com que os efeitos inerciais sejam grandes o suficiente tornando-se irrelevantes os efeitos gravitacionais. A Figura 64 (d) mostra as distribuições do  $V_B$  do ponto P17 na estação S3 para as inclinações  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ , onde pode-se observar que ocorre quase uma sobreposição das curvas.

Referindo-se ao  $L_B$ , a Figura 65 (a) mostra o ponto P11 ( $J_G=1,5$  m/s;  $J_L=0,5$  m/s) que sofre dissipação parcial das golfadas na região descendente. Percebe-se que quanto menor é a inclinação, maior é efeito da dissipação, devido ao aumento do  $L_B$ , pois isso significa que houve uma maior taxa de coalescência.

**Figura 65 - Evolução do  $L_B/D$  nos casos  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$  para os pontos (a) P11 e (b) P16; Distribuições de  $L_B$  (c) do ponto P11 e (d) do ponto P16 da estação S3 para as inclinações  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ .**



Fonte: autoria própria.

Observa-se também a tendência de recuperação do  $L_B$  na estação S4 da inclinação  $-7^\circ$ . As bolhas que coalesceram possuindo um grande comprimento na região descendente, tendem a quebrar em bolhas menores por não serem estáveis na região horizontal.

As distribuições do  $L_B$  do ponto P11 na estação S3 para as inclinações  $0^\circ$  e descendentes podem ser observadas na Figura 65 (c). Nota-se que com a diminuição da inclinação, os valores de  $L_B$  tendem a aumentar. Para o caso  $-7^\circ$ , observa-se valores que são quase o dobro dos valores encontrados para o caso horizontal, corroborando com o efeito de coalescência provocado pela dissipação parcial das golfadas, que é mais intenso conforme diminui-se a inclinação.

O ponto P16 ( $J_G=1,5$  m/s;  $J_L=2,5$  m/s), mostrado na Figura 65 (b), semelhante ao caso da velocidade do ponto P17 na Figura 64 (b), não apresenta variação significativa no  $L_B$  em todas as inclinações, devido aos altos pares de vazões. Isto pode ser verificado analisando a Figura 65 (d), que mostra as distribuições de  $L_B$  na estação S3 para as inclinações  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ , onde percebe-se que independente da inclinação, as curvas mantêm-se praticamente na mesma posição.

A fração de vazio na bolha também pode ser alterada pela mudança de direção descendente. A Figura 66 (a) traz o  $R_{GB}$  ao longo da tubulação, em que se observa que há um deslocamento para baixo dos valores de  $R_{GB}$  em relação ao horizontal. Isto ocorre devido a formação de uma cauda maior na região da traseira da bolha, que diminui o  $R_{GB}$  médio de cada bolha. Além disso, na região descendente, por conta da queda de pressão menor em relação ao escoamento horizontal, a bolha não expande tanto quanto o horizontal e o  $R_{GB}$  tende a ser menor.

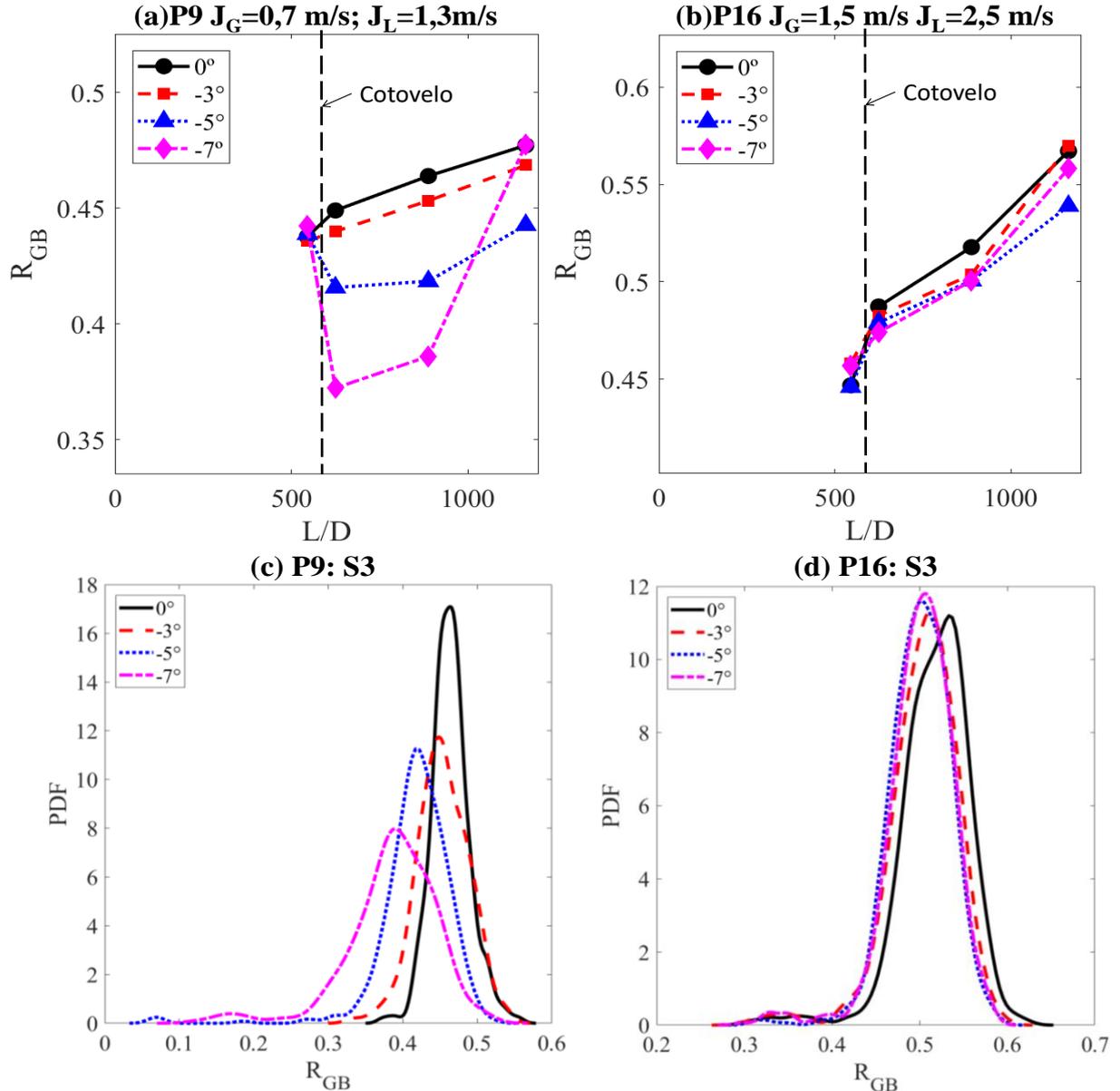
Os Vídeo 16 e Vídeo 17 mostram, respectivamente, o escoamento do ponto P9 horizontal e na inclinação de  $-7^\circ$ . Comparando os dois vídeos observa-se que a presença da inclinação gera uma cauda maior, que reduz o  $R_{GB}$ , justamente pelo filme de líquido escoar mais rápido criando uma hidrodinâmica diferente do caso horizontal. Além disso, observa-se uma presença maior de bolhas dispersas no caso horizontal do que no caso inclinado, isto ocorre, pois, a região de mistura na parte da cauda diminui conforme diminui a inclinação.

As distribuições de  $R_{GB}$  do ponto P9 na estação S3 variando-se as inclinações descendentes em comparação com horizontal podem ser observadas na Figura 66 (c). Percebe-se justamente a diminuição do  $R_{GB}$  ao diminuir-se a inclinação pelo deslocamento das curvas para a esquerda, devido aos efeitos descritos no parágrafo acima.

A Figura 66 (b) mostra a evolução do  $R_{GB}$  do ponto P16 ( $J_G=1,5$  m/s;  $J_L=2,5$  m/s) nos casos horizontal e descendentes. Nota-se que não há uma mudança significativa nas curvas, apenas um pequeno deslocamento para baixo dos casos descendentes. Este mesmo

deslocamento pode ser observado na Figura 66 (d), que traz as distribuições do ponto P16 na estação S3 para as 4 inclinações. Os casos descendentes tenderam a deslocar para esquerda em relação ao horizontal, apesar de não observar grandes mudanças entre eles.

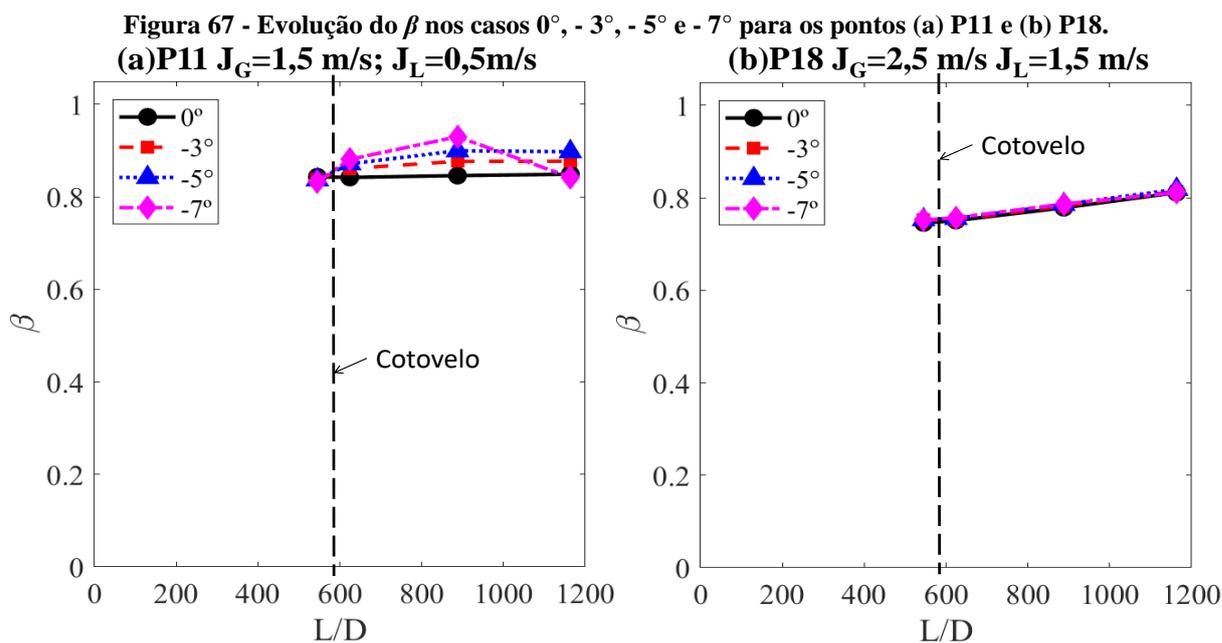
**Figura 66 - Evolução do  $R_{GB}$  nos casos  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$  para os pontos (a) P11 e (b) P16; Distribuições de  $R_{GB}$  (c) do ponto P9 e (d) do ponto P16 da estação S3 para as inclinações  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ .**



Fonte: autoria própria.

As Figuras 67 (a) e (b) mostram a evolução do  $\beta$  para os pontos P11 ( $J_G=1,5$  m/s;  $J_L=0,5$  m/s) e P18 ( $J_G=2,5$  m/s;  $J_L=1,5$  m/s). O  $\beta$  do ponto P11 é afetado pela inclinação descendente que provoca um aumento no comprimento da bolha por conta do aumento na coalescência devido a dissipação parcial das golfadas, como discutido anteriormente. O aumento do  $L_B$ , bem como a diminuição do  $L_S$ , faz com que o fator de intermitência aumente em função da

diminuição do ângulo de inclinação. Nota-se que conforme o  $L_B$ , na estação S4 da inclinação  $-7^\circ$ , o  $\beta$  tende a ter valores próximos aos valores do escoamento completamente horizontal. Por fim, o ponto P18 é mais um exemplo de escoamento, que devido ao seu alto par de vazões, praticamente não é afetado pelas mudanças de direção provocadas pelo cotovelo e pela região inclinada presente na tubulação.



#### 4.4.3 Escoamento com Bolha Invertida

Em inclinações descendentes, dependendo das condições do escoamento, um padrão de transição entre o escoamento estratificado e o intermitente pode ser observado. Kokal e Stanislav (1989a) foram uns dos primeiros a observar este tipo de escoamento, chamado por eles de *Wave Flooding*, que seria definido como um escoamento estratificado que em determinado momento não teve gás suficiente para manter a estratificação e o líquido “inundou” a tubulação gerando uma espécie de pistão. Por conta da inclinação descendente, o líquido é acelerado e provoca uma inversão na hidrodinâmica do gás, causando uma espécie de “bolha invertida” na tubulação.

Bendiksen (1984), por sua vez, observou que no escoamento em golfadas em tubulações inclinadas descendentes, pode ocorrer também uma inversão da bolha alongada. Esta inversão ocorre por conta da aceleração do líquido que altera a hidrodinâmica da região do filme e do pistão. O autor chama esse fenômeno de “*Bubble Turning*”.

Além disto, Fabre (2003) discute a formação da bolha invertida a partir de um escoamento estratificado líquido e gás. Se em um caso onde houver um escoamento estratificado, a força gravitacional for maior que a queda de pressão devida ao atrito, o líquido move-se muito mais rápido. Com esta diferença de velocidades entre as fases muito grande, instabilidades de K-H podem novamente ser geradas e dessa forma produzir um escoamento intermitente com a bolha apontando para cima.

Portanto, considerando as análises discutidas nos parágrafos acima, o que se acredita é que os autores supracitados estão tratando do mesmo tipo de escoamento. Um escoamento de transição entre o padrão estratificado e intermitente que pode ocorrer sobre certas condições em uma região inclinada. Este padrão é produzido a partir do escoamento estratificado, onde a velocidade do líquido é maior do que a do gás e, eventualmente, instabilidades são formadas. Tendo sido gerada as instabilidades de K-H, o líquido alcança novamente o topo da tubulação gerando um pistão de líquido e uma bolha com o nariz invertido e com uma região de mistura a sua frente.

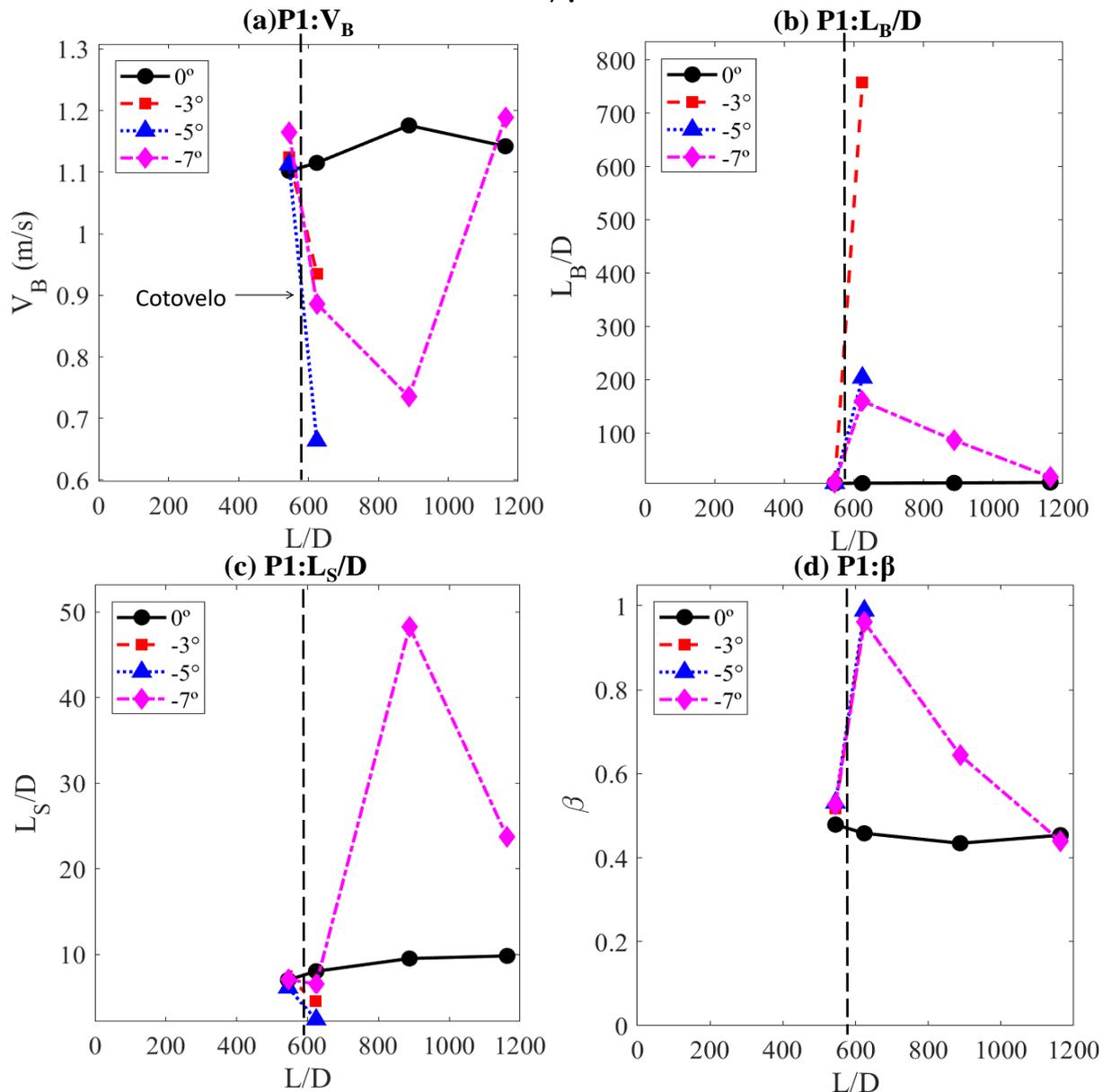
Este tipo de escoamento foi observado em um único ponto experimental, o ponto P1 ( $J_G=0,3$  m/s;  $J_L=0,7$  m/s) para a inclinação de  $-7^\circ$ . Como observado pelos outros autores, acontece sobre certas condições: inclinação descendente e um dado par de velocidades, onde o  $J_L$  seja maior que o  $J_G$ . Para as inclinações  $-3^\circ$  e  $-5^\circ$  houve estratificação, portanto, era esperado que houvesse uma estratificação para a inclinação  $-7^\circ$ . Mas como pode ser visto no Vídeo 18, as condições necessárias foram estabelecidas e o escoamento que tendia a estratificar, gerou pistões de líquido.

Por conter pistões e bolhas alongadas, pôde-se utilizar o programa desenvolvido por Vicencio (2013) para tentar caracterizar este padrão. A Figura 68 mostra a evolução de alguns parâmetros característicos do padrão em golfadas para o caso horizontal e para as inclinações descendentes.

A Figura 68 (a) exprime o  $V_B$ , onde observa-se que para as inclinações  $-3^\circ$  e  $-5^\circ$ , existe a tendência de diminuição da velocidade, devido ao empuxo, antes de estratificar e não possuir mais valores. No caso de  $-7^\circ$ , também se observa esta tendência na estação após o cotovelo (S2), ou seja, o escoamento estratificaria completamente, mas o gás escoando mais lentamente que o líquido, não conseguiu coalescer completamente. O pistão de líquido que tendia a dissipar-se acaba por receber mais líquido do filme que está escoando muito rápido, provocando um aumento deste pistão gerando um escoamento intermitente com o nariz da bolha apontando para cima.

Observa-se na Figura 68 (a) que na estação S3, a velocidade desacelera mais ainda, isso porque o que se calcula no processamento é a velocidade da frente da bolha, e como pode ser verificado no Vídeo 18, a frente da bolha assume a característica de uma região de mistura. O filme escoando mais rapidamente que o pistão, gera agora uma região de mistura a frente da bolha, onde percebe-se até retiradas de bolhas dispersas e uma constante desaceleração.

Figura 68 - Evolução de (a)  $V_B$ , (b)  $L_B/D$ , (c)  $L_S/D$  e (d)  $\beta$  para o ponto P1 para as inclinações  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ .



Fonte: autoria própria.

A Figura 68 (b) mostra a evolução do  $L_B$  ao longo da tubulação, onde percebe-se a tendência ao infinito antes de estratificar para as inclinações  $-3^\circ$  e  $-5^\circ$  na estação S2. Assim como o  $V_B$ , o  $L_B$ , na inclinação  $-7^\circ$ , também possui a mesma tendência, porém, como não se

concretiza a estratificação, existem valores de  $L_B$  na estação S3. Observa-se que ele tende a ir diminuindo, possivelmente por conta das bolhas que vão sendo retiradas ao longo da tubulação na região da frente da bolha devido a turbulência causada pela mistura dos líquidos do pistão com o do filme.

A evolução do  $L_S$  pode ser observada na Figura 68 (c), onde na inclinação  $-7^\circ$  também é possível verificar a tendência de dissipação dos pistões pelo seu decréscimo, mas ao invés disso, com a ocorrência do acúmulo de líquido, o  $L_S$  tende a aumentar ao longo da tubulação. O Vídeo 19 traz o exemplo de um momento em que as bolhas iriam coalescer, mas o filme de líquido, por escoar mais rápido, acumula-se com o pistão que estava em processo de dissipação. Dessa maneira, o pistão não se dissipa e, pelo contrário, tende a crescer pelo contínuo acúmulo de filme de líquido ao longo da tubulação.

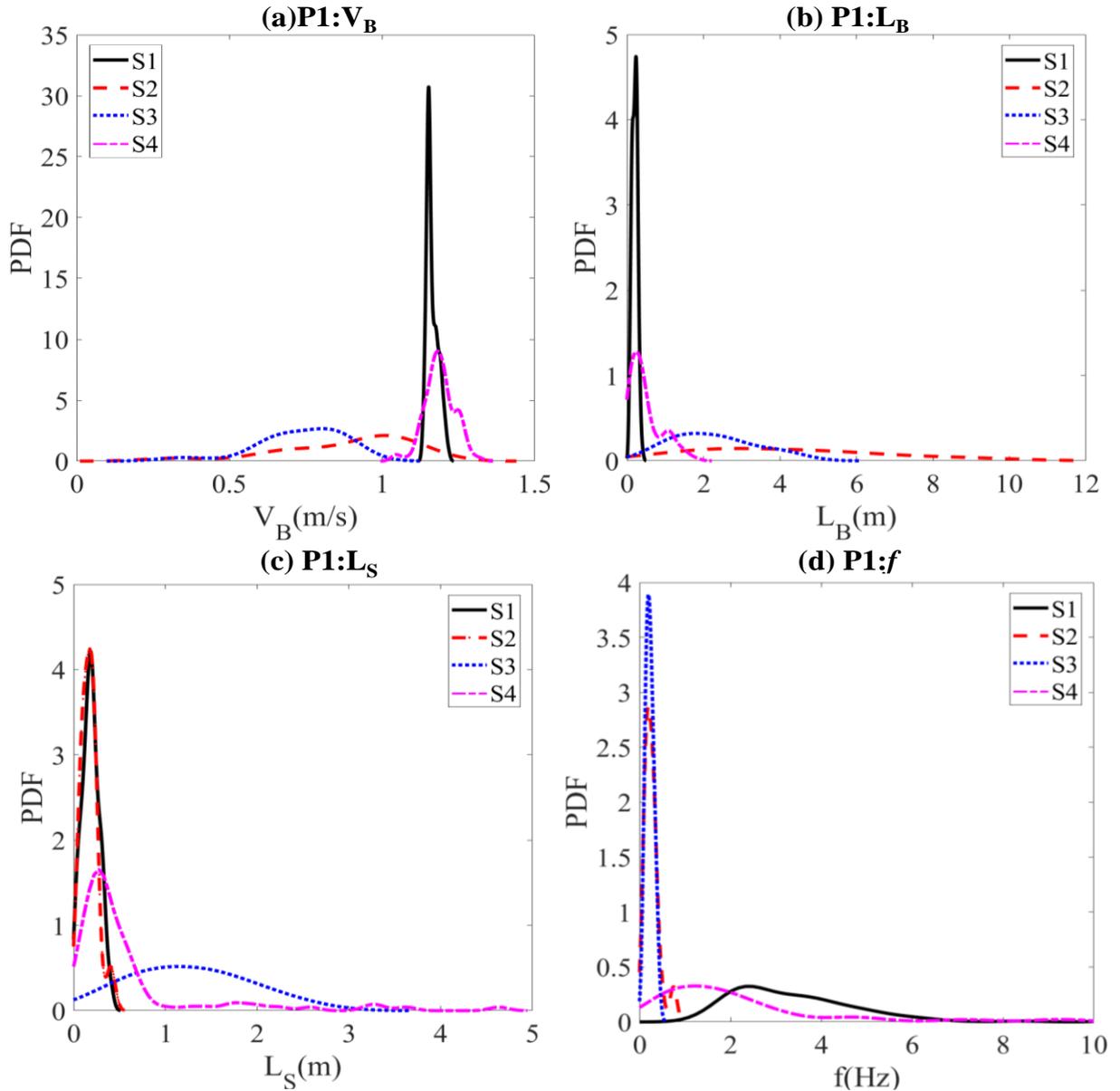
Observando por sua vez o  $\beta$  na Figura 68 (d), percebe-se que na estação S2 os valores são aproximadamente 1 para todas as inclinações descendentes, ou seja, praticamente um escoamento estratificado. Porém, para  $-7^\circ$ , com o aumento do  $L_S$  e a diminuição do  $L_B$ , o  $\beta$  tende a diminuir ao longo da tubulação, voltando a ser um escoamento intermitente.

Notou-se também que para todos os parâmetros na Figura 68, na estação S4 do escoamento de  $-7^\circ$  que volta a ser horizontal, ocorre a recuperação dos valores para o escoamento em golfadas no caso completamente horizontal. Percebeu-se também que nesta estação as bolhas voltam a apresentar a configuração convencional com o nariz apontando no sentido do escoamento.

A Figura 69 mostra as distribuições do ponto P1 na inclinação  $-7^\circ$  de algumas variáveis. Na Figura 69 (a), referente ao  $V_B$ , percebe-se a diminuição dos valores ao entrar na região inclinada, devido primariamente ao empuxo e depois por conta da inversão da bolha alongada, pois neste caso o acúmulo do líquido a frente da bolha a desacelera. A Figura 69 (b) mostra o  $L_B$ , que tende a aumentar muito logo após o cotovelo devido a dissipação das golfadas, porém na estação S3 ele tende a diminuir como discutido anteriormente.

Por fim, sobre este padrão de transição entre o estratificado e o golfadas, observou-se que o mesmo ponto experimental que para outras inclinações descendentes estratificava, na inclinação  $-7^\circ$  havia a tendência a estratificar, mas eventualmente gerava pistões. Com a geração de pistões, células unitárias eram formadas também, com bolhas alongadas invertidas, cujo nariz apresentava uma região de mistura que retirava bolhas dispersas e a traseira apresentava uma curvatura semelhante a um nariz. Desta maneira, conclui-se que a definição proposta por Kokal e Stanislav (1989a) é a que mais se aproxima do fenômeno observado neste trabalho.

**Figura 69 - Distribuições do ponto P1 na inclinação  $-7^\circ$  das variáveis (a)  $V_B$ , (b)  $L_B$ , (c)  $L_S$  e (d)  $f$ .**



Fonte: autoria própria.

#### 4.4.4 Pistão de Gás

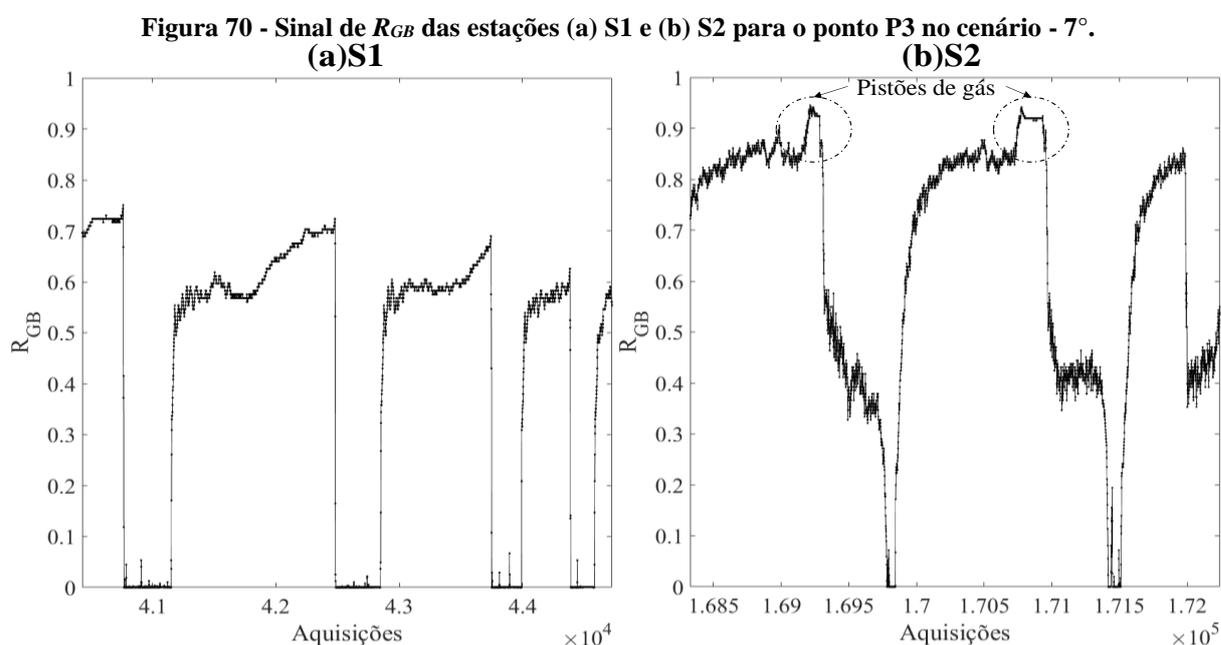
O escoamento em golfadas ao passar por um cotovelo superior pode ter o filme de líquido drenado pela ação da gravidade, tornando-o descontínuo. Se não houver suprimento suficiente de líquido, existirá uma região que o gás ocupa a seção transversal inteira da tubulação, chamada de pistão de gás, como discutido na Seção 2.3, na página 39.

Alves (2015) em seus experimentos não observou a formação do pistão de gás devido a drenagem do líquido. Ele alegou que possivelmente este fenômeno não foi observado por conta da tubulação adotada ter uma seção horizontal antes do cotovelo, gerando a drenagem apenas

no lado descendente do cotovelo. Porém, neste trabalho, utilizando a mesma configuração de cotovelo, horizontal seguido da inclinação, observou-se para o ponto experimental P3 ( $J_L=0,3$  m/s;  $J_G=0,7$  m/s), nas inclinações  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ , a drenagem do filme foi suficiente para que se formasse o pistão de gás. O Vídeo 20 mostra o exemplo da passagem de um pistão de gás na tubulação de  $-7^\circ$  para o ponto P3.

Investigando a grade de testes de Alves (2015), o autor não utilizou o mesmo par de velocidades do ponto P3. Então de certo modo, a configuração do cotovelo adotado não favorece o pistão de gás, uma vez que só há drenagem em um lado do cotovelo. O ponto P3 por possuir o  $J_G$  muito alto em comparação com o  $J_L$ , torna-se mais propício à ocorrência do pistão de gás, já que não tem líquido suficiente para suprir o filme na região descendente logo após o cotovelo.

O sensor da estação S2, posicionado logo após o cotovelo superior foi capaz de identificar a passagem do pistão de gás. As Figuras 70 (a) e (b) mostram os sinais de  $R_{GB}$  das estações S1 e S2, respectivamente.



Na Figura 70 (a) observa-se o sinal clássico de um sinal em golfadas, com  $R_{GB}$  para as bolhas em valores de no máximo 0,75. Ao passar pelo cotovelo, observa-se um sinal de transição entre o padrão em golfadas e o estratificado discutido Subseção 4.4.1 e mais uma vez exemplificado na Figura 70 (b). Porém, dessa vez, o valor de  $R_{GB}$  possui valores mais altos, e eventualmente, ocorre valores acima de 0,95, ou seja, praticamente gás passando na tubulação. Estes valores deveriam ser iguais a 1, mas possivelmente, restam gotículas de água nos fios do

sensor resistivo, fazendo com que os valores fiquem próximos a 1 apenas. Desta forma, esses patamares de valores de  $R_{GB}$  acima de 0,95 mostrados na Figura 70 (b) são os pistões de gás observados experimentalmente.

Assim como comentado na Seção 2.3, página 39, o cotovelo superior promove a formação de pistões de gás, mas se houver a dissipação sucessiva dos pistões de líquido, o que se observa ao longo da tubulação é a estratificação completa, sem a presença dos pistões de gás. Portanto, a formação de pistões de gás é um fenômeno intrínseco ao cotovelo, não tendo estabilidade para continuar escoando ao longo da tubulação.

### 4.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentados os resultados obtidos a partir dos experimentos desenvolvidos no NUEM-UTFPR. Primeiro foi mostrado a grade de testes utilizada, com base nas velocidades superficiais das fases, juntamente com o mapa de fluxo horizontal mostrando que para a tubulação horizontal, todos os pontos estavam dentro da região em golfadas.

Em seguida, mostrou-se os resultados para o escoamento completamente horizontal que serviu como validação dos resultados, pois compararam-se os principais parâmetros do escoamento com correlações existentes na literatura e observou-se que possuem as mesmas tendências. Apresentaram-se também as distribuições dos parâmetros, que também apresentaram formas em concordância com o que já foi apontado por outros autores.

Posteriormente, mostrou-se a influência da mudança de direção no escoamento em golfadas. Para o escoamento ascendente, mostraram-se as mudanças que ocorrem nos parâmetros característicos do padrão em golfadas, tanto devido a presença do cotovelo quanto da região inclinada. Também se discutiu os fenômenos que ocorrem no escoamento descendente, principalmente a dissipação das golfadas que geram a estratificação, bem como as mudanças que ocorrem nos parâmetros em pontos experimentais que não ocorrem a estratificação. Por fim, ainda no caso descendente, apresentou-se um padrão de transição que ocorre sobre dadas condições, bem como a presença de pistões de gás logo após o cotovelo superior.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi realizado um estudo experimental para analisar o efeito da mudança de direção no escoamento de água-ar no padrão golfadas em tubulações, que é encontrado com frequência nas linhas de produção de petróleo leito marinho (águas profundas). Foram utilizados três cenários, um completamente horizontal como referência, outro com um trecho horizontal seguido por um trecho inclinado ascendente e o último com um trecho horizontal seguido de um descendente. As inclinações utilizadas possuíam ângulos de  $\pm 3^\circ$ ,  $\pm 5^\circ$  e  $\pm 7^\circ$ .

Utilizaram-se quatro (4) estações de medição ao longo da tubulação de 0,026 m e 35,6 m de diâmetro interno e comprimento, respectivamente. Cada estação de medição era composta por um par de sensores resistivos espaçados por 0,026 m e um medidor de pressão. A partir do processamento dos sinais de fração de vazio do sensor resistivo, foi possível extrair os principais parâmetros característicos do escoamento em golfadas.

Ao todo foram testados 18 pontos experimentais, em três baterias de medições realizadas em dias diferentes para cada cenário. Após analisar a repetitividade das medições, a qual mostrou-se uma boa concordância com erros menores que 1% entre elas, escolheu-se mostrar os resultados de uma bateria de cada cenário. Os pontos experimentais foram escolhidos com base nas velocidades superficiais das fases, para que fosse identificado o padrão golfadas em todos os pontos na configuração horizontal.

Os resultados para o escoamento horizontal mostraram boa concordância com as correlações encontradas na literatura. Os tipos de distribuições encontradas para os parâmetros do escoamento em golfadas também estão de acordo com os apontados pelos diversos autores na literatura. Como por exemplo, as distribuições da velocidade e do comprimento das bolhas são do tipo normal, enquanto que a frequência exibiu uma distribuição log-normal.

A influência da mudança de direção no escoamento em golfadas foi analisada primeiramente para o escoamento ascendente. A Figura 71 mostra o resumo do comportamento observado das principais variáveis do escoamento em golfadas nos cenários ascendentes. Observou-se que a velocidade da bolha tende a aumentar com o aumento da inclinação, isso devido a dois fatores: o empuxo no gás no sentido do escoamento e a maior queda de pressão devida a coluna de líquido que expande ainda mais o gás acelerando a bolha.

As bolhas alongadas ao passarem por um cotovelo inferior, dependendo de suas velocidades superficiais, podem quebrar-se em duas devido ao acúmulo de líquido nesta região. Este mecanismo é um dos responsáveis pela diminuição do comprimento da bolha em regiões ascendentes. Outro fenômeno que foi observado é que o retorno do filme de líquido na região

ascendente faz com que a região de mistura seja mais intensa, provocando uma maior retirada de gás da traseira da bolha alongada. Isto também faz com que o comprimento diminua gradualmente ao longo da tubulação.

**Figura 71 – Resumo dos comportamentos das variáveis estudadas no caso ascendente.**

Direção	Variável	Comportamento	Causa
Ascendente	$V_B$	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empuxo a favor;</li> <li>• Maior queda de pressão;</li> </ul>
	$L_B$	↓	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quebra das bolhas;</li> <li>• Perda da cauda;</li> </ul>
	$L_S$	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acumulação de líquido;</li> </ul>
	$R_{GB}$	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perda da cauda;</li> </ul>
	$\beta$	↓	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor <math>L_B</math>;</li> <li>• Maior <math>L_S</math>.</li> </ul>

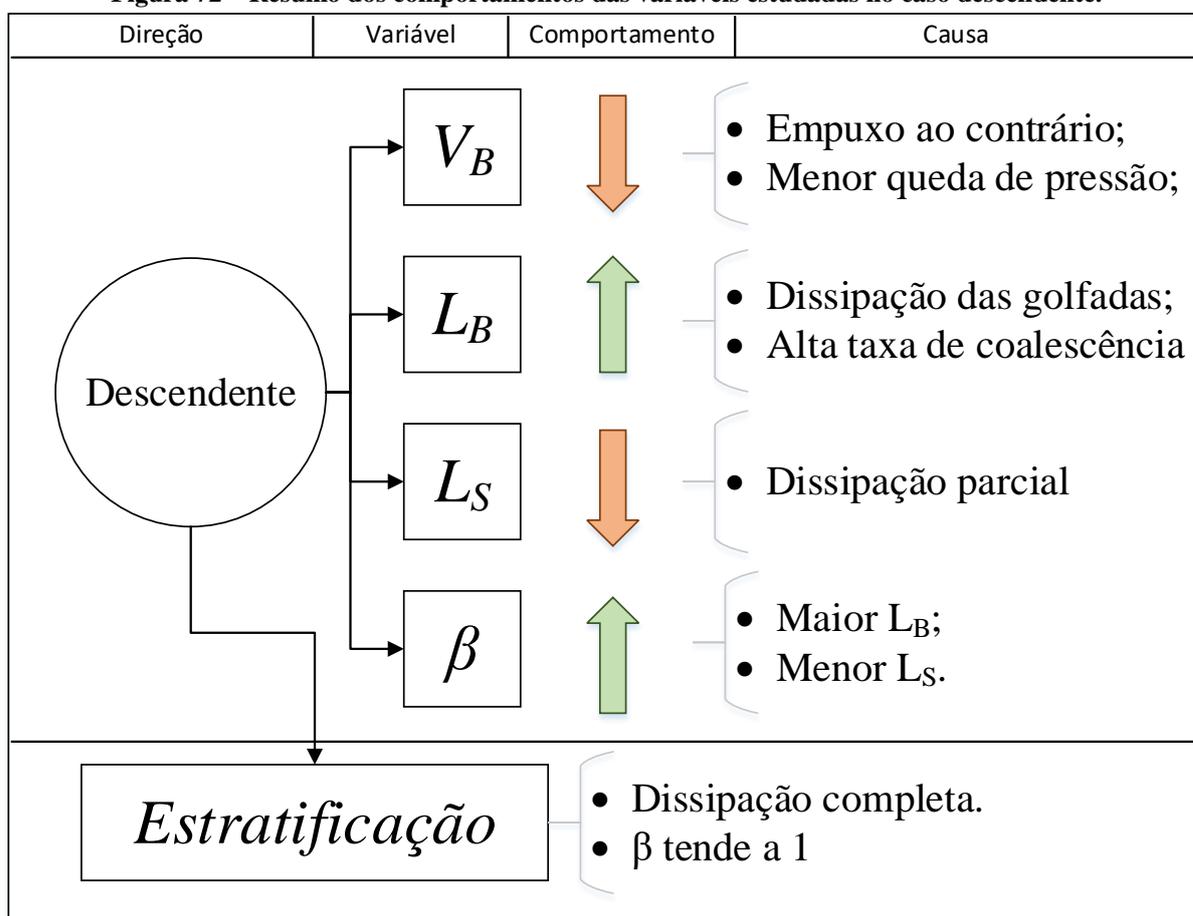
Fonte: autoria própria.

De maneira contrária, o pistão de líquido tende a aumentar em regiões ascendentes em comparação com o caso horizontal. Este crescimento torna-se mais acentuado na região do cotovelo, onde observou-se um maior acúmulo de líquido devido ao filme escoar contrário ao sentido do escoamento, devido à gravidade, encontrando-se com o pistão de líquido que está vindo da região horizontal indo para a região ascendente. Mas ao longo da tubulação também existe este acúmulo, porém, de forma gradual.

Notou-se que a frequência das golfadas não é muito influenciada pela inclinação ascendente, uma vez que, existe uma compensação entre o aumento do pistão e a diminuição da bolha. Porém, na região do cotovelo, para os pares de vazões mais baixas, observou-se que a quebra das bolhas provoca um aumento da frequência momentaneamente, mas ao longo da tubulação a frequência tende a diminuir novamente.

A Figura 72 traz o resumo do comportamento das principais variáveis do escoamento em golfadas para os cenários descendente. No caso descendente, o fenômeno mais importante é a estratificação de alguns dos pontos experimentais. Quando o escoamento em golfadas passa por um cotovelo superior ocorre a dissipação das golfadas. Esta dissipação é provocada pela aceleração do filme de líquido devido à gravidade, que retira líquido do pistão diminuindo seu comprimento até que as bolhas coalescem. A sucessiva dissipação gera a transição para o escoamento estratificado, em escoamentos com baixas vazões, pelos efeitos gravitacionais superarem os efeitos inerciais, como discutiram Schmidt, Brill e Beggs (1980). Observou-se que o modelo proposto por Taitel e Dukler (1976) não prevê todas as transições entre o escoamento em golfadas para o estratificado, como foi apontado por Alves et al. (2019).

**Figura 72 – Resumo dos comportamentos das variáveis estudadas no caso descendente.**



Fonte: autoria própria.

Antes de estratificar, identificou-se que há certas mudanças nos parâmetros do escoamento em golfadas. Na velocidade da bolha, observou-se um decréscimo após o cotovelo, devido ao empuxo no gás que é contrário ao escoamento desacelerando a bolha. O comprimento da bolha tende a ir para o infinito exatamente antes de estratificar, justamente, pela alta taxa de

coalescência devido a dissipação sucessiva dos pistões. Portanto, como era esperado, o comprimento dos pistões tende a diminuir drasticamente pela dissipação.

Mesmo não havendo a estratificação, alguns pontos são afetados pela mudança de direção. De forma semelhante, a velocidade da bolha tende a diminuir pelo empuxo, porém, a velocidade relativa entre as fases tende a aumentar ao longo da tubulação, aumentando a porção do atrito fazendo com que o líquido acelere a bolha, mas sempre havendo uma diferença entre os valores encontrados descendente em relação ao horizontal.

A dissipação mesmo sendo parcial, faz com que o comprimento da bolha aumente pelas coalescências ao longo da região descendente. Bem como o comprimento do pistão tende a diminuir pela perda de líquido para o filme, que acelera pela ação da gravidade.

Observou-se também um padrão de transição entre o escoamento em golfadas e o estratificado. A partir do escoamento em golfadas tendendo a estratificar, quando a velocidade do líquido é muito superior à do gás, eventualmente, um pistão que estava tendendo a desaparecer recebe líquido do filme que está bem mais rápido fazendo-o crescer. Gerando um padrão intermitente, com a hidrodinâmica contrária ao escoamento em golfadas convencional, onde pode-se observar o nariz formado na parte de trás da bolha e na sua frente uma região de mistura.

Além disto, percebeu-se a formação de pistão de gás na região logo após o cotovelo superior de  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ , para um ponto específico. Este pistão que já havia sido observado por outros autores em cotovelos cuja região a montante fosse inclinada, foi observado neste caso em um cotovelo com montante horizontal. Acreditava-se que o pistão de gás aconteceria em cotovelos com montante inclinada pois o filme escoaria para os dois lados, gerando uma região sem líquido, apenas com gás escoando. Mas na verdade, dependendo das condições de vazões, principalmente para baixas vazões de líquido e gás, sendo a do gás relativamente superior à do líquido, é possível observar este tipo de fenômeno.

No cenário de  $-7^\circ$ , na última estação que voltava à direção horizontal, percebeu-se que rapidamente o escoamento estratificado mudava para o padrão golfadas e os parâmetros recuperavam os valores como se o escoamento estivesse sido completamente horizontal. Nos pontos onde não havia estratificação, esta mesma tendência foi observada.

Conclui-se a partir dos dados experimentais o que já havia sido discutido por outros autores, que os efeitos gravitacionais causados pela mudança de direção só são relevantes em combinações com baixas vazões, onde os efeitos inerciais são relativamente baixos. Em pontos onde as vazões são relativamente altas, os efeitos inerciais e de turbulência são suficientemente elevados, sendo praticamente nula a influência dos efeitos da mudança de direção.

Afim de aprimorar as análises discutidas e os fenômenos encontrados no presente trabalho, sugere-se os estudos futuros:

- Avaliar a presença de múltiplos cotovelos, pois existem efeitos que acontecem em um único cotovelo que não são propagados, mas talvez a presença de vários vales e picos proporcione mudanças nos parâmetros do escoamento em golfadas;
- Utilizar fluidos com maiores viscosidades em cenários com mudança de direção, para avaliar os efeitos gravitacionais em fluidos mais próximos dos fluidos de produção de petróleo;
- Um estudo com maior número de estações de medições ao longo da tubulação, para avaliar em seu início a alta taxa de coalescência e no fim da tubulação o efeito de saída observado neste trabalho, por exemplo.

## REFERÊNCIAS

- ABDULKADIR, M., HERNANDEZ-PEREZ, V., LO, S., LOWNDES, I.S., AZZOPARDI, B. J. Comparison of Experimental and Computational Fluid Dynamics (CFD) Studies of Slug Flow in a Vertical Riser. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 68, p. 468-483, 2015.
- ALMEIDA, V. R. D. **Simulação numérica do escoamento intermitente utilizando uma metodologia híbrida baseada no acoplamento dos modelos de captura de golfadas e de seguimento de pistões**. Curitiba: [s.n.], 2017. 164 p. Dissertação (Mestrado) - UTFPR.
- AL-SAFRAN, E., SARICA, C., ZHANG, H.-Q., BRILL, J. Investigation of slug flow characteristics in the valley of a hilly-terrain pipeline. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 31, p. 337-357, 2005.
- AL-SAFRAN, E. M., JAYAWARDENA, S. S., BRILL, J., ZHANG, H.-Q., REDUS, C. L. **An experimental study of two-phase flow in a hilly-terrain pipeline**. Petroleum Production Technology Symposium. Nova Orleans: [s.n.]. 2000.
- AL-SAFRAN, E. M.; TAITEL, Y.; BRILL, J. P. Prediction of slug distribution along a hilly terrain pipeline using slug tracking model. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 126, p. 54, 2004.
- ALVES, I. N.; SHOHAM, O.; TAITEL, Y. Drift velocity of elongated bubbles in inclined pipes. **Chemical Engineering Science**, Great Britain, v. 48, n. 17, p. 3063-3070, 1993.
- ALVES, R. **Estudo Experimental do Escoamento Bifásico Líquido Gás em Golfadas com Leve Mudança de Direção**. Curitiba: [s.n.], 2015. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- ALVES, R. F., SCHNEIDER, F. A., BARBUTO, F. A., SANTOS, P. H. D., MORALES, R. E. M. An experimental analysis on the influence of flow direction changes on the transitions in gas-liquid, slug-to-stratified downward flows. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 119, p. 155-165, Julho 2019.
- ANTUNES, M. A., COZIN, C., BARBUTO, F. A., MORALES, R. E. M., RODRIGUES, H. T. Analysis of slug frequency correlations for two-phase gas liquid horizontal slug flow. **ASME**, Illinois, p. 6, Agosto 2014.
- AZZOPARDI, B. J. Drops in annular two-phase flow. **Int. J. Multiphase Flow**, Grã-Bretanha, v. 23, p. 1-53, 1997.
- BARNEA, D. SHOHAM, O., TAITEL, Y., DUKLER, A. E. Flow pattern transition for gas-liquid flow in horizontal and inclined pipes: comparison of experimental data with theory. **International Journal of Multiphase Flow**, Grã-Bretanha, v. 6, p. 217-225, 1980.
- BARNEA, D.; BRAUNER, N. Holdup of the liquid slug in two phase intermittent flow. **Int. J. Multiphase Flow**, USA, v. 11, n. 1, p. 43-49, 1985.
- BARNEA, D.; TAITEL, Y. A model for slug length distribution in gas-liquid slug flow. **Int. J. Multiphase Flow**, Great Britain, v. 19, n. 5, p. 829-838, 1993.
- BEGGS, H. D.; BRILL, J. P. A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes. **Journal of Petroleum Technology**, San Antonio, v. 255, p. 607-617, Maio 1973.

- BEHRINGER, H. The Flow of Liquid-Gas Mixtures in Vertical Tubes". **Ges. Kälte-Ind.**, Washington, D.C, v. 43, p. 55-58, 1936.
- BENDIKSEN, K. H. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. **Int. J. Multiphase Flow**, EUA, v. 10, n. 4, p. 467- 483, 1984.
- BENDIKSEN, K. H.; LANGSHOLT, M.; LIU, L. An experimental investigation os the motion of long bubbles in high viscosity slug front in horizontal pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 104, p. 60-73, 2018.
- BERTOLA, V. Experimental characterization of gas-liquid intermittent subregimes by phase density function measurements. **Experiments in Fluid**, v. 34, p. 122-129, 2003.
- BONNECAZE, R. H.; ERSKINE JR., W.; GRESKOVICH, E. J. Holdup and Pressure Drop for Two-Phase Slug Flow in Inclined Pipelines. **AIChE Journal**, v. 17, n. 5, p. 1109-1113, Setembro 1971.
- BRILL, J. P., SCHMIDT, Z., COBERLY, W. A., HERRING, J. D., MOORE, D. W. Analysis of two-phase tests in large-diameter flow lines in Prudhoe Bay Field. **SPE J**, p. 363-377, 1981.
- BUENO, L. G. G. **Estudo Experimental de escoamentos Líquido-Gás Intermitentes Em Tubulações Inclinadas**. Campinas: [s.n.], 2010.
- CHELSKI, A. **Estudo experimental dos escoamentos em golfadas com mudança de direção**. Curitiba: [s.n.], 2012. 98 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - UTFPR.
- CONTE, M. G. **Estudo Numérico e Experimental da Geração de Golfadas em um Escoamento Bifásico de Gás-Líquido**. Curitiba: [s.n.], 2014. 136 p. Dissertação (Mestrado) - Univeridade Tecnológica Federal do Paraná - 2014.
- CONTE, M. G., BASSANI, C. L., PEREA, C. D., SCORSIM, O. B. S., DO AMARAL, C. E. F., MORALES, R. E. M. **Numerical analysis of slug flow for slight changes of direction using slug tracking model**. CILAMCE. [S.l.]: [s.n.]. 2011.
- CONTE, M. G., HEDGE, G. A., DA SILVA, M. J., SUM, A. K., MORALES, R. E. M. Characterization of Slug Initiation for Horizontal Air-Water Two-Phase Flow. **Experimentao Thermal and Fluid Science**, v. 87, p. 80-92, 2017.
- CROWE, C. T. **Multiphase Flow Handbook**. Boca Raton: Taylor&Francis Group, 2005.
- DAVIES, R. M.; TAYLOR, F. G. The mechanics of large bubbles rising through extended liquids and through liquids in tubes. **Royal Society Publishing**, Londres, v. 200, n. 1062, p. 375-390, Fev 1950.
- DUKLER, A. E.; HUBBARD, M. G. A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. **Ind. Eng. Chem. Fundam.**, v. 14, n. 4, p. 11, 1975.
- DUKLER, A. E.; MARON, D. M.; BRAUNER, N. A physical model for predicting the minimum stable slug length. **Chemical Engineering Science**, Great Britain, v. 40, n. 88, p. 1379-1385, 1985.
- ECONOMIDES, M. J., HILL, A. D., EHLIG-ECONOMIDES, C., ZHU, D. **Petroleum Production Systems**. 2ª. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2013.

- ERSOY, G. SARICA, C., AL-SAFRAN, E. ZHANG, H.-Q. Three-Phase gas-oil-water flow in undulating pipeline. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 156, p. 468-483, 2017.
- FABRE, J. Gas-liquid slug flow. In: BERTOLA, V. **Modelling and Experimentation in Two-Phase Flow**. Nova Iorque: Springer-Verlag Wien, 2003. Cap. 3, p. 433.
- FABRE, J. Gas-Liquid Slug Flow. In: BERTOLA, V. **Modelling and Experimentation in Two-Phase Flow**. Nova York: Springer-verlag Wien Gmbh, 2003. Cap. 3, p. 117-156.
- FABRE, J.; LINÉ, A. Modeling of Two-Phase Slug Flow. **Fluid Mechanics**, v. 24, p. 21-46, 1992.
- FAGUNDES NETTO, J. R.; FABRE, J.; PERESSON, L. Shape of long bubbles in horizontal slug flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 25, p. 1129-1160, 1999.
- FOSSA, M.; GUGLIELMINI, G.; MARCHITTO, A. Intermittent flow parameters from void fraction analysis. **Flow measurement and instrumentation**, v. 14, p. 161-168, 2003.
- GODHAVN, J.-M.; FARD, M. P.; FUCHS, P. H. New Slug Control Strategies, Tuning Rules and Experimental Results. **Jornal of Process Control**, v. 15, p. 547-557, 2005.
- GREGORY, G. A.; NICHOLSON, M. K.; AZIZ, K. Correlation of the liquid volume fraction in the slug for horizontal gas-liquid slug flow. **Int. J. Multiphase Flow**, Grã-Bretanha, v. 4, p. 33-39, 1978.
- GREGORY, G. A.; SCOTT, D. S. Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal cocurrent gas-liquid slug flow. **AIChE Journal**, v. 15, n. 6, p. 933-935, Novembro 1969.
- GRESKOVICH, E. J.; COOPER, W. R. Correlation and Prediction of Gas-Liquid Holdups in Inclined Upflows. **AIChE Journal**, v. 21, n. 6, p. 1189-1192, Novembro 1975.
- GRIFFITH, P.; WALLIS, G. **Slug Flow**. The Office of Naval Research. Cambridge, p. 42. 1959. (15).
- HENAU, V. D.; RAITHBY, G. D. A study of terrain-induced slugging in two-phase flow pipelines. **Int. J. Multiphase Flow**, Grã-Bretanha, v. 21, n. 3, p. 365-379, 1995.
- HEYWOOD, N. I.; RICHARDSON, J. F. Slug flow of air-water mixtures in a horizontal pipe: determination of liquid hodup by gamma-ray absorption. **Chemical Engineering Science**, Great Britain, v. 34, p. 17-30, 1979.
- HOAGLIN, D. C.; IGLEWICZ, B.; TUKEY, J. W. Performance os some resistant rules for outlier labeling. **Journal of the American Statistical Association**, v. 81, n. 396, p. 991-999, 1986.
- HUBERT, M.; VANDERVIEREN, E. An adjusted boxplot for skewed distributions. **Computational statistics & data analyses**, v. 52, n. 12, p. 5186-5201, 2008.
- JULIA, J. E. LIU, Y., HIBIKI, T., ISHII, M. Local flow regime analysis in vertical co-current downward two-phase flow. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 44, p. 10, 2013.
- KOKAL, S. L.; STANISLAV, J. F. An Experimental Study of Two-Phase Flow in Slightly Inclined Pipes-I. Flow Patterns. **Chemical Engineering Science**, Grã Bretanha, v. 44, n. 3, p. 663-679, 1989a.

- KORDYBAN, E. S. A Flow Model for the Two-Phase Slug Flow in. **The Engineering Journal**, Montreal, v. 4, Março 1961.
- KORDYBAN, E. S.; RANOV, T. Mechanismo of Slug Formation in Horizontal Two-Phase Flow. **Journal of Basic Engineering**, p. 858-864, Dezembro 1970.
- LIMA, L. E.; ROSA, E. S. Comparative analysis of wall shear stress models to the drift-flux model applied to slug flow regime. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 122, p. 371-383, 2014.
- LLANTOY PARRA, V. E. **Escoamento bifásico líquido-gás em golfadas com leve mudança de direção**. Curitiba: [s.n.], 2013. 158 p. Dissertação (Mestrado) - UTFPR.
- MACHADO, D.; HILDEBRANDO, F.; LIPINSKI, L. **Sistema multicanal de sensores resistivos para medição de escoamentos bifásicos**. Curitiba: [s.n.], 2013. 64 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - UTFPR.
- MALEKZADEH, R. **Severe slugging in gas-liquid two-phase pipe flow**. Delft: [s.n.], 2012. 180 p. Tese (Doutorado) - Universidade de Tecnologia de Delft - 2012.
- MANDAL, T. K. BHUYAN, M. K., DAS, G., DAS, P. K. Effect of undulation on gas-liquid two-phase flow through a horizontal pipeline. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 86, p. 269-278, 2008.
- MANDHANE, J. M.; GREGORY, G. A.; AZIZ, K. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. **Int. J. Multiphase Flow**, Grã Betânia, v. 1, p. 537-553, 1974.
- MOISSIS, R.; GRIFFITH, P. Entrance Effects in a Two-Phase Slug Flow. **ASME**, p. 10, Fevereiro 1962.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.
- MUKHERJEE, H.; BRILL, J. P. Liquid Holdup Correlations for Inclined Two-Phase Flow. **Journal of Petroleum Technology**, p. 1003-1008, Maio 1983.
- NICHOLSON, M. K.; AZIZ, K.; GREGORY, G. A. Intermittent two phase flow in horizontal pipes: predictive models. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 56, p. 653-663, Dezembro 1978.
- NICKLIN, D. J.; WILKES, J. O.; DAVIDSON, J. F. Two-phase flow in vertical tubes. **Trans. Instn. Chem. Engrs**, v. 40, p. 8, 1962.
- NYDAL, O. J.; BANERJEE, S. Dynamic slug tracking simulations for gas-liquid flow in pipeline. **Chemical Engineering Science**, v. 141, p. 13-39, 1995.
- NYDAL, O. J.; 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.
- PEREZ, V. H. **Gas-Liquid two-phase flow in inclined pipes**. Nottingham: [s.n.], 2007. 294 p. Tese (Doutorado) - University of Nottingham.
- RENPU, W. **Advanced Well Completion Engineering**. 3ª. ed. Oxford: Elsevier, 2011.
- RODRIGUES, H. T. **Simulação numérica do escoamento bifásico gás-líquido no padrão de golfadas utilizando um modelo lagrangeano de seguimento de pistões**. Curitiba: [s.n.], 2009. 195 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - 2009.

- RODRIGUES, R. L. D. P. **Caracterização experimental do escoamento bifásico de gás-líquido descendente em golfadas em tubulações**. Curitiba: [s.n.], 2015. 96 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Tecnológica do Paraná, 2015.
- ROUMAZEILLES, P. M., YANG, J., SARICA, C., CHEN, X. T., WILSON, J. F., BRILL, J. P. An Experimental Study on Downward Slug Flow in Inclined Pipes. **SPE Production & Facilities**, p. 173-178, 1996.
- SAETHER, G., BENDIKSEN, K., MÜLLER, J., FRØLAND, E. The fractal statistics of liquid slug lengths. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 16, n. 6, p. 1117-1126, 1990.
- SCHMIDT, Z.; BRILL, J. P.; BEGGS, H. D. Experimental study of severe slugging in a two-phase flow pipeline-riser pipe system. **Society of Petroleum Engineers Journal**, v. 20, p. 407-414, 1980.
- SCHWERTMAN, N. C.; OWENS, M. A.; ADNAN, R. A. A simple more general boxplot method for identifying outliers. **Computational statistics & data analysis**, v. 47, n. 1, p. 165-174, 2004.
- SCHWERTMAN, N. C.; SILVA, R. Identifying outliers with sequential fences. **Computational statistics & data analysis**, v. 51, n. 8, p. 3800-3810, 2007.
- SCOTT, S. L.; KOUBA, G. E. **Advances in Slug Flow Characterization for Horizontal Slightly Inclined Pipelines**. 65th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers. New Orleans: Editorial Committees of the Society of Petroleum Engineers. 1990. p. 125-140.
- SHARMA, Y.; IHARA, M.; MANABE, R. **Simulating slug flow in hilly-terrain pipelines**. SPE International Petroleum Conference and Exhibition. Villahermosa: [s.n.]. 2002. p. 8.
- SHEMER, L. Hydrodynamic and statistical parameters of slug flow. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 24, p. 334-344, 2003.
- SHOHAM, O. **Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow Pipes**. Estados Unidos da América: Society of Petroleum Engineers, 2006.
- SINGH, G.; GRIFFITH, P. Determination of the Pressure Drop Optimum Pipe Size for a Two-Phase Slug Flow in an Inclined Pipe. **Journal of Engineering for Industry**, v. 92, p. 717-726, Novembro 1970.
- SPINDLER, K.; HAHNE, E. An Experimental Study of the Void Fraction Distribution in Adiabatic Water-Air Two-Phase Flows in an Inclined Tube. **International Journal of Thermal Science**, Paris, v. 38, p. 305-314, 1999.
- STANISLAV, J. F.; KOKAL, S.; NICHOLSON, M. K. Intermittent gas-liquid flow in upward inclined pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, Grã-Bretanha, v. 12, n. 3, p. 325-335, 1986.
- TAITEL, Y. Effect of gas expansion on slug length in long pipelines. **International Journal of Multiphase Flow**, Grã-Bretanha, v. 13, n. 5, p. 629-637, Março 1987.
- TAITEL, Y., SIMKHIS, M., TEVELEV, A., BARNEA, D. Transient gas liquid flow in hilly terrain pipelines. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 86, p. 21-27, 2016.
- TAITEL, Y.; BARNEA, D. Two-phase slug flow. **Journal of heat transfer**, v. 20, n. J. P. Hartnett & J. Thomas F. Irvine, p. 83-132, 1990.

- TAITEL, Y.; BARNEA, D. Effect of gas compressibility on a slug tracking model. **Chemical Engineering Science**, Grã-Bretanha, v. 53, n. 11, p. 2089-2097, 1998.
- TAITEL, Y.; BARNEA, D. Slug-Tracking model for hilly terrain pipelines. **SPE Journal**, v. 5, n. 1, p. 102-109, Março 2000.
- TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. **AiChE Journal**, v. 22, n. 1, p. 47-54, Janeiro 1976.
- TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. A model for slug frequency during gas-liquid flow in horizontal and near horizontal pipes. **Int. J. Multiphase Flow**, Grã-Bretanha, v. 3, p. 585-596, 1977.
- TAITEL, Y.; SARICA, C.; BRILL, J. P. Slug flow modeling for downward inclined pipe flow: theoretical considerations. **International Journal of multiphase flow**, v. 26, p. 833-844, 2000.
- TAITEL, Y.; SHOHAM, O.; BRILL, J. P. Transiente two-phase flow in low velocity hilly terrain pipelines. **International Journal Multiphase Flow**, Grã-Bretanha, v. 16, n. 1, p. 69-77, 1990.
- TRONCONI, E. Prediction of slug frequency in horizontal two-phase slug flow. **AiChE Journal**, v. 36, n. 5, p. 701-709, maio 1990.
- TUKEY, J. W. Exploratory data analysis. **Reading, Ma**, v. 231, p. 32, 1977.
- VERMEULEN, L. R.; RYAN, J. T. Two-phase Slug Flow in Horizontal and Inclined Pipes. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 49, p. 195-201, Abril 1971.
- VICÊNCIO, F. **Caracterização experimental do escoamento intermitente líquido-gás em tubulações horizontais**. Curitiba: [s.n.], 2013. 132 p. Dissertação (Mestrado) - UTFPR.
- VICENCIO, F. E. C., SCHNEIDER, F. A., COZIN, C., BARBUTO, F. A., DA SILVA, M. J., MORALES, R. E. M. **An Experimental Characterization of Horizontal Gas-Liquid Slug Flow**. International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Houston, Texas: ASME. 2015. p. 7.
- WALLIS, G. B. **One-Dimensional Two-phase Flow**. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1969.
- WEBER, M. Drift in intermittent two-phase flow in horizontal pipes. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 59, p. 398-399, Junho 1981.
- WOOD, D. Mechanistic modeling of terrain-induced slugs in gas/condensate lines. **Proceedings of BHRG Multiphase Conference**, 1991.
- YIN, P., CAO, X., LI, Y., YANG, W., BIAN, J. Experimental and Numerical Investigation on Slug Initiation and Initial Development Behavior in Hilly-Terrain Pipeline at a Low Superficial Liquid Velocity. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 101, p. 85-96, 2018.
- ZABARAS, G. J. Prediction of slug frequency for gas/liquid flows. **SPE Journal**, v. 5, n. 3, p. 252-258, setembro 2000.
- ZHENG, G. H.; BRILL, J. P.; SHOHAM, O. An experimental study of two-phase slug flow in hilly terrain pipelines. **67TH Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers**, Washington DC, p. 8, Outubro 1992.

ZHENG, G.; BRILL, J. P.; TAITEL, Y. Slug flow behavior in a hilly terrain pipeline. **Int. J. Multiphase Flow**, Grã-Bretanha, v. 20, n. 1, p. 63-79, 1994.

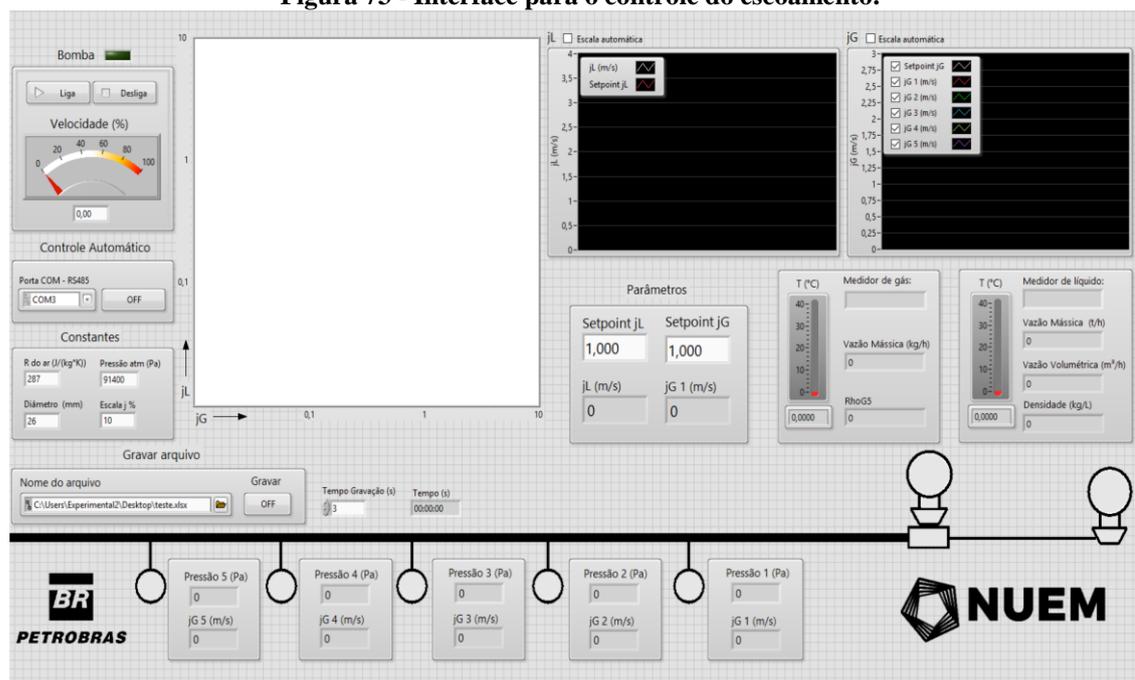
ZUBER, N.; FINDLAY, J. A. Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems. **Journal of Heat Transfer**, p. 453-468, Novembro 1965.

## APÊNDICE A – SISTEMA SUPERVISÓRIO

Neste apêndice é descrito o sistema supervisório utilizado na bancada experimental. A aquisição dos dados no circuito experimental foi feita a partir de uma rede de comunicação com protocolo *Foundation Fieldbus*, conectada por cabos de transmissão entre e os sensores e uma placa de aquisição do tipo PCI. A placa PCI era da marca *National Instruments* e estava acoplada ao computador.

A rede *Fieldbus* conectava os medidores de vazão, temperatura e de pressão com a placa de aquisição a partir dos sinais digitais emitidos. Os sinais eram obtidos pela placa e eram visualizados e armazenados no computador com o auxílio do *software LabVIEW*, que possuía uma interface de acesso ao usuário como mostrado na Figura 73. Essa interface era dedicada então ao controle e leitura das propriedades do escoamento, como por exemplo, as vazões mássicas e velocidades superficiais dos fluidos e a pressão em cada seção de medição.

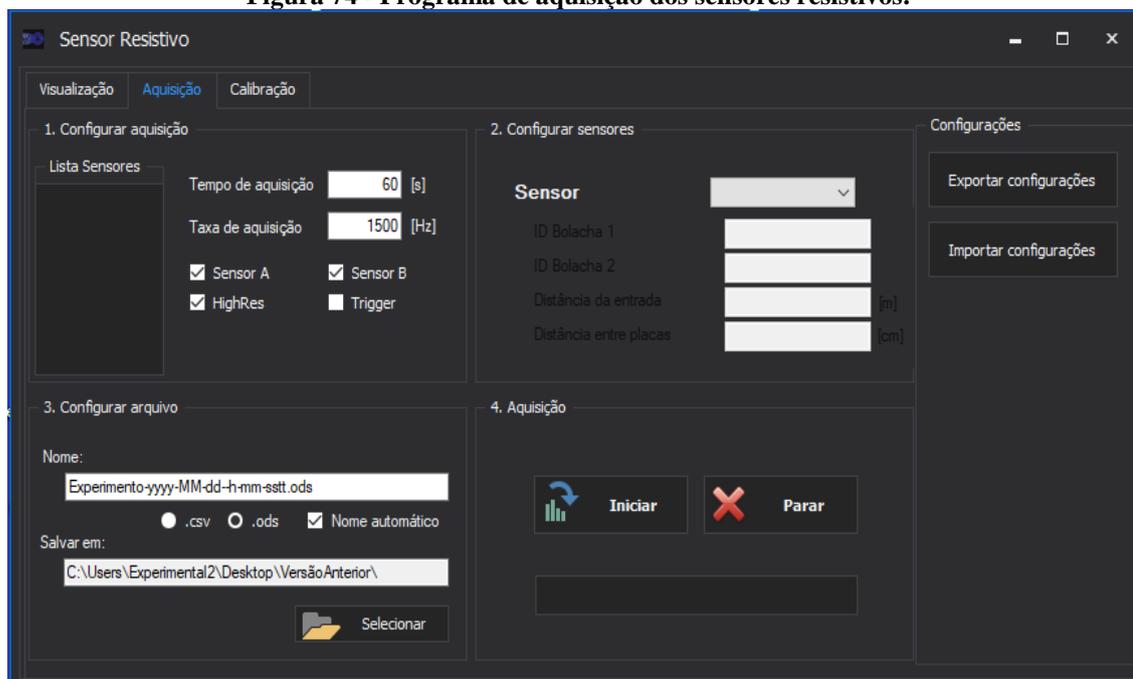
Figura 73 - Interface para o controle do escoamento.



Fonte: autoria própria.

A Figura 74 mostra a interface do programa que foi desenvolvido no NUEM para ler e controlar os sensores resistivos. O programa permitia calibrar os sensores com o tubo cheio de líquido e com ar para depois comparar com o escoamento no processamento. Podia-se selecionar também os sensores à serem utilizados, além de selecionar as taxas de aquisição e tempo de teste.

Figura 74 - Programa de aquisição dos sensores resistivos.



Fonte: autoria própria.

## APÊNDICE B - INCERTEZAS

Neste apêndice é realizada a análise das incertezas presentes na bancada experimental. Ao medir-se uma variável qualquer ( $X$ ) sempre haverá uma incerteza na medição, podendo ser por exemplo, do tipo padrão ( $\sigma$ ) ou expandida com confiança  $Z$  ( $k\sigma$ ). As incertezas avaliadas são para as velocidades superficiais do líquido ( $J_L$ ) e do gás ( $J_G$ ), a fração de vazão ( $R_G$ ) e o ângulo de inclinação ( $\theta$ ). A análise realizada neste trabalho é fundamentada na descrição de Vuolo (1996).

Uma das definições para a incerteza padrão é que ela pode ser o desvio padrão da distribuição de erros. Por sua vez, a incerteza expandida com uma confiança  $Z$  é definida como o múltiplo da incerteza padrão. A confiança  $Z$  de uma medida é definida como a probabilidade  $Z$  desta medida estar correta. Portanto, assumindo-se uma distribuição para os erros do tipo normal (gaussiana), pode-se considerar que o erro de uma certa medida em comparação com o valor correto pertence ao intervalo  $[-\sigma, \sigma]$ , com uma confiança de  $Z=68,27\%$ , segundo a distribuição T de Student. Para uma confiança de  $Z=99,83\%$ , pela mesma distribuição, deve-se utilizar o intervalo de  $[-3\sigma, 3\sigma]$ .

Sendo assim, objetivou-se na análise deste apêndice determinar a incerteza padrão das medidas experimentais, bem como os valores para uma incerteza expandida com confiança de  $P=99,83\%$  ( $3\sigma$ ).

### B.1 Propagação das Incertezas

Uma variável  $X$  em uma medida experimental é encontrada como função de outras grandezas experimentais ( $x_n$ ). Desta forma, esta variável pode ser expressa na forma  $X_i = X_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . À vista disso, considerando-se  $\sigma_n$  a incerteza padrão da grandeza  $x_n$ , pode-se propagar esta incerteza para a incerteza padrão da variável  $X$  ( $\sigma_X$ ), segundo a Equação (63):

$$\sigma_X^2 = \left(\frac{\partial X}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial X}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_n^2 \quad (63)$$

Dividindo os dois lados da Equação (63) por  $X^2$  e rearranjando têm-se a Equação (64):

$$\left(\frac{\sigma_X}{X}\right)^2 = \left(\frac{1}{X} \frac{\partial X}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{1}{X} \frac{\partial X}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_2^2 + \dots + \left(\frac{1}{X} \frac{\partial X}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_n^2 \quad (64)$$

Utilizando um artifício matemático na Equação (64) chega-se a Equação (65):

$$\left(\frac{\sigma_X}{X}\right)^2 = \left(\frac{x_1}{X} \frac{\partial X}{\partial x_1}\right)^2 \left(\frac{\sigma_1}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{x_2}{X} \frac{\partial X}{\partial x_2}\right)^2 \left(\frac{\sigma_2}{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{X} \frac{\partial X}{\partial x_n}\right)^2 \left(\frac{\sigma_n}{x_n}\right)^2 \quad (65)$$

Desta maneira, obtêm-se o conceito de incerteza padrão relativa como mostrado na Equação (66):

$$\varepsilon_n = \frac{\sigma_n}{X} \quad (66)$$

Substituindo a Equação (66) na Equação (65) obtêm-se por fim:

$$\varepsilon_X^2 = \left(\frac{x_1}{X} \frac{\partial X}{\partial x_1}\right)^2 \varepsilon_1^2 + \left(\frac{x_2}{X} \frac{\partial X}{\partial x_2}\right)^2 \varepsilon_2^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{X} \frac{\partial X}{\partial x_n}\right)^2 \varepsilon_n^2 \quad (67)$$

## B.2 Estimativa das Incertezas das Variáveis Experimentais

Os valores são mostrados sob a forma de incerteza padrão relativa ( $\varepsilon$ ). Para realizar o cálculo da propagação das incertezas das variáveis utilizadas, deve-se primeiro definir quais são as incertezas do diâmetro da tubulação, da altura de líquido adimensional, dos instrumentos de medição de vazão, de temperatura, de pressão e de inclinação. A Tabela 4 expõe os valores utilizados.

A medição do diâmetro do tubo foi realizada com um paquímetro, com resolução de 0,05 mm. Utiliza-se comumente a incerteza padrão como sendo a menor escala de divisão do instrumento, portanto, neste caso  $\sigma_D = 0,025$  mm. Desta maneira a incerteza padrão relativa é encontrada dividindo pelo próprio valor do diâmetro, obtendo  $\varepsilon_D = \pm 0,10\%$ .

As vazões de líquido e de gás e a temperatura são medidas pelos medidores do tipo Coriolis da *Yokogawa*®. As incertezas padrões relativas das vazões são obtidas a partir do

catálogo de calibração fornecidos pelo fabricante. No caso da temperatura, é fornecida a incerteza padrão ( $\sigma=0,2\text{K}$ ), portanto, dividiu-se pela menor temperatura mensurada ( $+10^\circ\text{C}=283,15\text{K}$ ) para obter uma máxima incerteza padrão relativa.

**Tabela 4 - Incertezas padrões relativas dos instrumentos utilizados**

<b>Mensurando</b>	<b>Incerteza padrão relativa (<math>\epsilon</math>)</b>
Diâmetro ( $D$ )	$\pm 0,10\%$
Ângulo ( $\theta$ )	$\pm 3,33\%$
Pressão ( $P$ )	$\pm 0,08\%$
Vazão de líquido ( $Q_L$ )	$\pm 0,05\%$
Vazão mássica de gás ( $\dot{m}_G$ )	$\pm 0,05\%$
Altura de líquido adimensional ( $h_L/D$ )	$\pm 0,53\%$
Temperatura	$\pm 0,07\%$

Fonte: autoria própria.

A incerteza padrão relativa da pressão é obtida a partir do certificado de calibração dos fabricantes. O ângulo de inclinação foi conferido utilizando um inclinômetro da *Bosch*®. O catálogo de calibração informa a incerteza padrão do instrumento como sendo de  $\sigma=0,1^\circ$ , assim, para encontrar a incerteza padrão relativa dividiu-se pelo menor ângulo utilizado que foi de  $\theta=\pm 3^\circ$ .

A incerteza da altura de líquido adimensional foi encontrada com base na calibração do sensor resistivo. Durante as calibrações, realizam-se medidas de tensão para o escoamento monofásico de líquido durante 60 segundos com uma frequência de aquisição de 450 Hz. O valor médio destas medidas de tensão é utilizado posteriormente para normalizar as medidas de tensão durante os testes experimentais bifásicos como uma medida de referência. Esta normalização converte os valores de tensão em uma altura de líquido adimensional,  $h_L/D=V/V_{ref}$ . Portanto, sabendo-se que o  $h_L/D$  é função da tensão de referência monofásico ( $V_{ref}$ ) e da tensão do escoamento bifásico ( $V$ ), propagou-se as incertezas na obtenção destas variáveis para o  $h_L/D$ . A incerteza padrão para o  $V_{Ref}$  encontrado foi de  $\sigma_{V_{ref}}=0,38\text{V}$ , sendo a menor  $V_{ref}=192,2\text{V}$  é possível obter a  $\epsilon_{V_{ref}}=0,22\%$ . Para a tensão do escoamento bifásico, considerou-se um valor de  $V=0,4 V_{ref}$ , pois é um valor comum para a bolha alongada no escoamento em golfadas. Da mesma forma, obtêm-se  $\epsilon_V=0,49\%$ .

Por conseguinte, tendo os valores das incertezas padrões relativas do  $V_{Ref}$  e do  $V$ , foi possível propagar as incertezas utilizando a Equação (65) para encontrar incerteza padrão relativa da altura de líquido adimensional como sendo  $\epsilon_{h_L/D}=0,53\%$ .

Com a posse de todos os valores de incertezas padrões relativas, aplica-se a propagação das incertezas utilizando a Equação (65), nas Equações (66), (67) e (68) que calculam  $J_L$ ,  $J_G$  e  $R_G$ , respectivamente, em função das variáveis apresentadas na tabela 4.

$$J_L = \frac{\dot{Q}_L}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} \quad (68)$$

$$J_G = \frac{4 RT \dot{m}_G}{P_{S1} \pi D^2} \quad (69)$$

$$R_G = 1 - \frac{1}{\pi} \left[ \arccos \left( 1 - \frac{2h_L}{D} \right) - \left( 1 - \frac{2h_L}{D} \right) \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{2h_L}{D} \right)^2} \right] \quad (70)$$

Por fim, as incertezas padrões relativas obtidas para as variáveis medidas estão apresentadas na Tabela 5.

**Tabela 5 - Incertezas padrões relativas calculadas**

Mensurando	Incerteza padrão relativa ( $\epsilon$ )
Velocidade superficial do líquido ( $J_L$ )	$\pm 0,21\%$
Velocidade superficial do gás ( $J_G$ )	$\pm 0,23\%$
Ângulo ( $\theta$ )	$\pm 3,33\%$
Fração de vazio ( $R_G$ )	$\pm 0,42\%$

Fonte: autoria própria.

Considerando-se a incerteza expandida com confiança de  $Z=99,83\%$  ( $3\sigma$ ), os valores para  $J_L$ ,  $J_G$ ,  $\theta$  e  $R_G$  são 0,62%, 0,69%, 10% e 1,26%, respectivamente.

## APÊNDICE C - VÍDEOS

Neste apêndice encontram-se os hiperlinks para o acesso dos vídeos na internet. Para acessar deve-se: segurar o CTRL+clique com o botão direito no hiperlink. O hiperlink do canal onde estão todos os vídeos é:

<https://www.youtube.com/channel/UC0TmcmXCamNR1k3O9VNJ18w>

### **Vídeo 01**

<https://youtu.be/ZSiEhsB82Z0>

### **Vídeo 02**

<https://youtu.be/s8rRJuBufb8>

### **Vídeo 03**

<https://youtu.be/1djA63uLQYY>

### **Vídeo 04**

<https://youtu.be/OTHL0YdFdtY>

### **Vídeo 05**

<https://youtu.be/hw-iokybJno>

### **Vídeo 06**

<https://youtu.be/-PwGl24YIaM>

### **Vídeo 07**

[https://youtu.be/19\\_BTUfR8ws](https://youtu.be/19_BTUfR8ws)

### **Vídeo 08**

<https://youtu.be/NrcsCD3ebOM>

### **Vídeo 09**

<https://youtu.be/v7ohzB7iJaU>

### **Vídeo 10**

<https://youtu.be/HuwTxLr64zM>

### **Vídeo 11**

<https://youtu.be/mQa673GzYEI>

### **Vídeo 12**

<https://youtu.be/QmCFTrXUa5s>

### **Vídeo 13**

<https://youtu.be/4R8MnAYyRP4>

### **Vídeo 14**

<https://youtu.be/V8AEDnHdt0>

**Vídeo 15**

<https://youtu.be/ploiIuG8gRI>

**Vídeo 16**

<https://youtu.be/Sp5DrnQ5ugw>

**Vídeo 17**

<https://youtu.be/2s62uR9V7W4>

**Vídeo 18**

<https://youtu.be/EFmkuimeQ6E>

**Vídeo 19**

<https://youtu.be/r7rR4OiWvMI>

**Vídeo 20**

<https://youtu.be/o7MuTuXOTnY>

## **APÊNDICE D - RESULTADOS MÉDIOS E DESVIOS PADRÕES**

Neste apêndice são apresentados os resultados médios e os desvios padrões dos parâmetros do escoamento em golfadas obtidos pelo processamento dos sensores resistivos. A Subseção D.1 traz os valores médios e desvios padrões para os cenários ascendentes e horizontal, nos Quadro 1 a Quadro 10. Por sua vez, a Subseção D.2 traz os casos descendentes e horizontal nos Quadro 11 a Quadro 20.

## D.1 ASCENDENTE

Quadro 1 - Valores médios de  $V_B$  (m/s) para os cenários  $0^\circ$ ,  $+3^\circ$ ,  $+5^\circ$  e  $+7^\circ$ .

Ponto	$0^\circ$				$+3^\circ$				$+5^\circ$				$+7^\circ$			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>P1</b>	1,102	1,115	1,176	1,142	1,085	1,147	1,218	1,226	1,124	1,151	1,218	1,229	1,096	1,174	1,238	1,263
<b>P2</b>	1,145	1,150	1,211	1,199	1,117	1,164	1,240	1,254	1,111	1,155	1,246	1,273	1,145	1,176	1,268	1,303
<b>P3</b>	1,127	1,138	1,234	1,216	1,131	1,155	1,229	1,255	1,145	1,139	1,237	1,277	1,136	1,109	1,271	1,315
<b>P4</b>	1,697	1,722	1,860	1,866	1,683	1,756	1,921	1,944	1,699	1,754	1,914	1,942	1,700	1,796	1,911	1,970
<b>P5</b>	1,707	1,738	1,855	1,880	1,697	1,766	1,893	1,947	1,745	1,760	1,918	1,966	1,724	1,799	1,940	2,027
<b>P6</b>	2,321	2,354	2,580	2,590	2,345	2,405	2,596	2,623	2,341	2,410	2,590	2,643	2,340	2,388	2,626	2,755
<b>P7</b>	1,693	1,740	1,865	1,901	1,681	1,782	1,928	1,951	1,698	1,752	1,926	1,951	1,720	1,812	1,938	2,003
<b>P8</b>	2,313	2,390	2,625	2,632	2,317	2,374	2,636	2,779	2,317	2,414	2,608	2,744	2,283	2,443	2,637	2,767
<b>P9</b>	2,313	2,382	2,589	2,644	2,325	2,427	2,642	2,731	2,344	2,407	2,608	2,704	2,328	2,382	2,623	2,736
<b>P10</b>	2,322	2,421	2,622	2,672	2,315	2,371	2,616	2,706	2,307	2,387	2,591	2,743	2,349	2,449	2,649	2,746
<b>P11</b>	2,325	2,368	2,546	2,599	2,318	2,414	2,626	2,691	2,349	2,406	2,624	2,702	2,322	2,424	2,634	2,742
<b>P12</b>	3,444	3,625	3,788	4,093	3,445	3,613	3,906	4,298	3,531	3,658	3,849	4,221	3,469	3,701	3,857	4,284
<b>P13</b>	3,372	3,666	3,825	4,309	3,451	3,765	3,913	4,489	3,466	3,682	3,987	4,807	3,426	3,685	3,973	4,857
<b>P14</b>	3,484	3,672	3,803	4,473	3,549	3,735	3,913	4,902	3,522	3,645	3,966	4,868	3,430	3,683	3,986	4,953
<b>P15</b>	4,863	5,119	5,565	5,766	4,938	5,162	5,594	5,807	5,184	5,372	5,509	5,792	5,247	5,376	5,507	5,852
<b>P16</b>	4,504	5,171	5,416	5,840	4,838	5,122	5,659	5,856	4,887	5,154	5,578	5,923	4,827	5,037	5,485	5,840
<b>P17</b>	4,635	5,163	5,512	6,186	4,851	5,114	5,620	5,943	4,914	5,158	5,377	5,945	4,668	5,136	5,476	5,948
<b>P18</b>	4,772	5,167	5,564	6,287	5,021	5,462	5,752	6,123	5,014	5,473	5,666	6,263	4,919	5,351	5,569	6,137

Quadro 2 - Desvios padrões de  $V_B$  (m/s) para os cenários  $0^\circ$ ,  $+3^\circ$ ,  $+5^\circ$  e  $+7^\circ$ .

Ponto	$0^\circ$				$+3^\circ$				$+5^\circ$				$+7^\circ$			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>P1</b>	0,058	0,055	0,051	0,050	0,063	0,046	0,036	0,034	0,031	0,037	0,033	0,033	0,054	0,022	0,035	0,034
<b>P2</b>	0,037	0,038	0,035	0,036	0,034	0,037	0,035	0,039	0,051	0,039	0,036	0,034	0,029	0,046	0,039	0,037
<b>P3</b>	0,047	0,049	0,040	0,045	0,047	0,062	0,048	0,044	0,052	0,082	0,058	0,061	0,066	0,080	0,052	0,063
<b>P4</b>	0,057	0,087	0,074	0,063	0,077	0,086	0,027	0,039	0,053	0,079	0,037	0,045	0,068	0,073	0,063	0,060
<b>P5</b>	0,079	0,080	0,075	0,071	0,076	0,068	0,071	0,042	0,093	0,114	0,096	0,113	0,083	0,113	0,112	0,131
<b>P6</b>	0,069	0,056	0,173	0,159	0,115	0,145	0,232	0,254	0,116	0,141	0,187	0,168	0,110	0,058	0,175	0,119
<b>P7</b>	0,044	0,073	0,071	0,040	0,037	0,079	0,033	0,036	0,072	0,086	0,026	0,021	0,082	0,076	0,063	0,083
<b>P8</b>	0,072	0,103	0,188	0,180	0,034	0,049	0,179	0,119	0,172	0,159	0,228	0,188	0,136	0,159	0,192	0,177
<b>P9</b>	0,125	0,149	0,181	0,173	0,031	0,140	0,181	0,163	0,029	0,139	0,180	0,163	0,061	0,062	0,191	0,162
<b>P10</b>	0,154	0,184	0,200	0,179	0,043	0,062	0,186	0,191	0,146	0,171	0,216	0,192	0,152	0,204	0,240	0,285
<b>P11</b>	0,146	0,177	0,236	0,202	0,144	0,220	0,187	0,201	0,026	0,221	0,192	0,257	0,158	0,197	0,205	0,181
<b>P12</b>	0,368	0,400	0,576	0,771	0,366	0,366	0,600	0,867	0,307	0,289	0,626	0,821	0,327	0,265	0,633	0,836
<b>P13</b>	0,512	0,436	0,801	0,951	0,429	0,095	0,496	0,806	0,427	0,319	0,686	0,671	0,383	0,348	0,836	0,719
<b>P14</b>	0,373	0,520	0,617	0,874	0,350	0,533	0,829	0,790	0,427	0,480	0,387	0,919	0,427	0,482	0,871	0,891
<b>P15</b>	0,829	0,711	0,353	0,394	0,789	0,670	0,441	0,811	0,477	0,388	0,414	0,826	0,365	0,336	0,481	0,804
<b>P16</b>	0,990	0,709	0,728	0,567	0,703	0,679	0,290	0,445	0,772	0,648	0,361	0,604	0,653	0,724	0,641	0,493
<b>P17</b>	1,025	0,812	0,905	1,557	0,737	0,663	0,897	0,921	0,772	0,637	1,001	1,027	0,820	0,733	0,724	1,008
<b>P18</b>	0,933	0,881	1,006	1,544	0,738	0,336	0,543	1,087	0,701	0,452	0,922	1,283	0,752	0,595	0,908	1,065

Quadro 3 - Valores médios de  $L_B$  (m) para os cenários  $0^\circ$ ,  $+3^\circ$ ,  $+5^\circ$  e  $+7^\circ$ .

Ponto	$0^\circ$				$+3^\circ$				$+5^\circ$				$+7^\circ$			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>P1</b>	0,168	0,177	0,190	0,212	0,203	0,176	0,218	0,254	0,210	0,170	0,218	0,245	0,210	0,154	0,208	0,257
<b>P2</b>	0,607	0,632	0,702	0,736	0,580	0,563	0,629	0,663	0,552	0,513	0,603	0,641	0,590	0,530	0,624	0,666
<b>P3</b>	2,092	2,147	2,406	2,385	1,792	1,593	1,780	1,838	1,736	1,467	1,670	1,750	1,668	1,315	1,655	1,739
<b>P4</b>	0,236	0,243	0,284	0,302	0,227	0,239	0,295	0,333	0,220	0,230	0,287	0,326	0,230	0,242	0,287	0,333
<b>P5</b>	1,278	1,317	1,436	1,490	1,276	1,276	1,404	1,473	1,356	1,300	1,450	1,511	1,272	1,249	1,396	1,484
<b>P6</b>	0,155	0,167	0,209	0,241	0,158	0,167	0,215	0,251	0,145	0,154	0,202	0,245	0,150	0,156	0,208	0,267
<b>P7</b>	0,528	0,546	0,612	0,639	0,525	0,550	0,639	0,680	0,520	0,514	0,601	0,639	0,535	0,531	0,602	0,659
<b>P8</b>	0,574	0,601	0,704	0,739	0,576	0,582	0,688	0,760	0,585	0,594	0,686	0,764	0,570	0,576	0,661	0,747
<b>P9</b>	0,286	0,298	0,344	0,375	0,265	0,281	0,347	0,404	0,261	0,271	0,334	0,381	0,257	0,267	0,342	0,396
<b>P10</b>	1,229	1,291	1,442	1,495	1,247	1,255	1,422	1,492	1,236	1,227	1,365	1,481	1,250	1,242	1,394	1,478
<b>P11</b>	2,267	2,312	2,533	2,595	2,297	2,315	2,537	2,681	2,282	2,215	2,477	2,607	2,286	2,184	2,507	2,675
<b>P12</b>	0,277	0,301	0,341	0,402	0,257	0,285	0,334	0,413	0,267	0,285	0,331	0,424	0,253	0,281	0,334	0,424
<b>P13</b>	0,621	0,687	0,755	0,900	0,630	0,681	0,757	0,924	0,623	0,647	0,740	0,944	0,621	0,658	0,734	0,965
<b>P14</b>	1,505	1,575	1,636	2,014	1,468	1,542	1,668	2,169	1,413	1,445	1,657	2,060	1,455	1,476	1,706	2,184
<b>P15</b>	0,141	0,149	0,203	0,256	0,120	0,138	0,160	0,202	0,136	0,149	0,154	0,211	0,131	0,160	0,167	0,284
<b>P16</b>	0,302	0,350	0,408	0,515	0,299	0,326	0,366	0,487	0,326	0,359	0,439	0,540	0,334	0,346	0,440	0,542
<b>P17</b>	0,626	0,713	0,799	0,976	0,624	0,667	0,743	0,885	0,644	0,679	0,751	0,938	0,627	0,663	0,762	0,893
<b>P18</b>	1,226	1,328	1,479	1,766	1,280	1,414	1,535	1,709	1,305	1,422	1,555	1,768	1,268	1,342	1,490	1,683

Quadro 4 - Desvios padrões de  $L_B$  (m) para os cenários  $0^\circ$ ,  $+3^\circ$ ,  $+5^\circ$  e  $+7^\circ$ .

Ponto	$0^\circ$				$+3^\circ$				$+5^\circ$				$+7^\circ$			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>P1</b>	0,076	0,078	0,092	0,110	0,071	0,075	0,090	0,100	0,066	0,066	0,083	0,089	0,104	0,066	0,086	0,098
<b>P2</b>	0,225	0,228	0,252	0,262	0,205	0,198	0,218	0,225	0,191	0,185	0,196	0,212	0,209	0,178	0,197	0,201
<b>P3</b>	1,500	1,545	1,695	1,668	0,550	0,488	0,547	0,561	0,566	0,563	0,543	0,559	0,604	0,563	0,589	0,638
<b>P4</b>	0,066	0,070	0,074	0,070	0,078	0,081	0,086	0,098	0,078	0,084	0,097	0,111	0,092	0,086	0,085	0,096
<b>P5</b>	0,430	0,458	0,480	0,516	0,490	0,511	0,544	0,570	0,519	0,511	0,541	0,567	0,528	0,535	0,572	0,588
<b>P6</b>	0,047	0,048	0,056	0,062	0,046	0,051	0,063	0,062	0,048	0,048	0,056	0,059	0,047	0,046	0,055	0,064
<b>P7</b>	0,200	0,211	0,227	0,234	0,190	0,192	0,197	0,212	0,184	0,175	0,198	0,197	0,166	0,158	0,170	0,177
<b>P8</b>	0,195	0,206	0,239	0,243	0,180	0,179	0,210	0,224	0,180	0,183	0,203	0,212	0,167	0,179	0,196	0,208
<b>P9</b>	0,057	0,059	0,064	0,082	0,082	0,082	0,100	0,112	0,082	0,082	0,109	0,116	0,080	0,081	0,097	0,104
<b>P10</b>	0,438	0,490	0,566	0,563	0,460	0,459	0,537	0,586	0,495	0,514	0,561	0,591	0,513	0,522	0,537	0,545
<b>P11</b>	0,885	0,912	0,993	0,998	0,954	0,969	1,009	1,052	0,875	0,869	0,905	0,977	0,800	0,830	0,878	0,940
<b>P12</b>	0,071	0,070	0,087	0,112	0,096	0,093	0,129	0,163	0,085	0,080	0,109	0,151	0,093	0,084	0,111	0,144
<b>P13</b>	0,216	0,231	0,292	0,341	0,222	0,211	0,259	0,313	0,213	0,195	0,243	0,272	0,206	0,205	0,259	0,272
<b>P14</b>	0,574	0,578	0,643	0,858	0,626	0,674	0,690	0,876	0,622	0,625	0,616	0,804	0,651	0,681	0,746	0,848
<b>P15</b>	0,076	0,085	0,130	0,174	0,075	0,079	0,125	0,194	0,063	0,074	0,099	0,183	0,057	0,084	0,114	0,220
<b>P16</b>	0,127	0,124	0,150	0,174	0,142	0,136	0,166	0,200	0,136	0,143	0,159	0,186	0,125	0,129	0,162	0,184
<b>P17</b>	0,250	0,254	0,273	0,380	0,265	0,255	0,301	0,327	0,264	0,224	0,278	0,318	0,250	0,240	0,254	0,305
<b>P18</b>	0,522	0,510	0,572	0,734	0,537	0,536	0,564	0,646	0,491	0,519	0,577	0,686	0,501	0,508	0,507	0,623

Quadro 5 - Valores médios de  $L_s$  (m) para os cenários  $0^\circ$ ,  $+3^\circ$ ,  $+5^\circ$  e  $+7^\circ$ .

Ponto	$0^\circ$				$+3^\circ$				$+5^\circ$				$+7^\circ$			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>P1</b>	0,183	0,209	0,248	0,256	0,158	0,234	0,295	0,329	0,177	0,247	0,323	0,350	0,147	0,232	0,314	0,367
<b>P2</b>	0,351	0,377	0,425	0,412	0,304	0,401	0,437	0,433	0,288	0,399	0,453	0,452	0,305	0,435	0,473	0,466
<b>P3</b>	0,616	0,647	0,719	0,680	0,439	0,584	0,654	0,643	0,426	0,592	0,674	0,648	0,402	0,576	0,684	0,673
<b>P4</b>	0,254	0,262	0,291	0,291	0,232	0,263	0,313	0,326	0,224	0,255	0,310	0,326	0,223	0,263	0,311	0,319
<b>P5</b>	0,370	0,385	0,414	0,412	0,379	0,450	0,470	0,462	0,406	0,488	0,511	0,493	0,366	0,470	0,506	0,504
<b>P6</b>	0,210	0,226	0,273	0,296	0,195	0,215	0,265	0,282	0,179	0,210	0,261	0,295	0,186	0,218	0,266	0,302
<b>P7</b>	0,303	0,312	0,337	0,337	0,297	0,339	0,378	0,368	0,289	0,335	0,378	0,365	0,285	0,354	0,372	0,351
<b>P8</b>	0,302	0,311	0,335	0,313	0,301	0,321	0,342	0,339	0,298	0,328	0,348	0,346	0,292	0,347	0,354	0,353
<b>P9</b>	0,254	0,261	0,282	0,261	0,229	0,253	0,289	0,297	0,234	0,258	0,287	0,293	0,226	0,265	0,292	0,301
<b>P10</b>	0,347	0,366	0,391	0,384	0,364	0,414	0,435	0,434	0,357	0,410	0,434	0,430	0,353	0,442	0,460	0,444
<b>P11</b>	0,421	0,434	0,461	0,462	0,426	0,524	0,546	0,526	0,431	0,530	0,574	0,558	0,431	0,536	0,618	0,614
<b>P12</b>	0,249	0,273	0,270	0,266	0,210	0,254	0,258	0,253	0,239	0,268	0,276	0,279	0,207	0,265	0,271	0,287
<b>P13</b>	0,312	0,339	0,339	0,344	0,288	0,352	0,359	0,361	0,283	0,330	0,340	0,362	0,309	0,353	0,356	0,362
<b>P14</b>	0,395	0,402	0,408	0,430	0,341	0,421	0,427	0,485	0,338	0,414	0,450	0,500	0,359	0,441	0,468	0,525
<b>P15</b>	0,269	0,304	0,339	0,444	0,194	0,259	0,267	0,267	0,311	0,360	0,432	0,443	0,363	0,337	0,430	0,387
<b>P16</b>	0,236	0,318	0,308	0,306	0,233	0,291	0,303	0,253	0,262	0,278	0,291	0,275	0,286	0,329	0,334	0,279
<b>P17</b>	0,314	0,352	0,343	0,326	0,279	0,375	0,368	0,337	0,299	0,383	0,370	0,329	0,314	0,394	0,375	0,336
<b>P18</b>	0,418	0,440	0,420	0,411	0,398	0,457	0,419	0,400	0,434	0,491	0,468	0,439	0,395	0,478	0,434	0,411

Quadro 6 - Desvios padrões de  $L_s$  (m) para os cenários  $0^\circ$ ,  $+3^\circ$ ,  $+5^\circ$  e  $+7^\circ$ .

Ponto	$0^\circ$				$+3^\circ$				$+5^\circ$				$+7^\circ$			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>P1</b>	0,098	0,100	0,111	0,116	0,089	0,095	0,112	0,116	0,097	0,106	0,128	0,119	0,084	0,098	0,131	0,127
<b>P2</b>	0,144	0,140	0,142	0,131	0,119	0,136	0,130	0,121	0,121	0,149	0,156	0,145	0,134	0,160	0,161	0,142
<b>P3</b>	0,297	0,307	0,319	0,262	0,153	0,210	0,226	0,230	0,170	0,243	0,249	0,238	0,146	0,224	0,248	0,279
<b>P4</b>	0,083	0,085	0,082	0,076	0,098	0,107	0,104	0,100	0,099	0,106	0,118	0,111	0,096	0,110	0,109	0,096
<b>P5</b>	0,132	0,133	0,118	0,118	0,164	0,189	0,179	0,159	0,168	0,190	0,207	0,195	0,152	0,190	0,205	0,201
<b>P6</b>	0,097	0,099	0,111	0,097	0,092	0,100	0,103	0,094	0,089	0,099	0,111	0,100	0,090	0,097	0,107	0,099
<b>P7</b>	0,113	0,113	0,100	0,080	0,116	0,123	0,108	0,098	0,111	0,123	0,114	0,093	0,093	0,113	0,099	0,092
<b>P8</b>	0,106	0,110	0,102	0,089	0,107	0,107	0,105	0,096	0,111	0,123	0,108	0,088	0,103	0,119	0,108	0,092
<b>P9</b>	0,072	0,074	0,069	0,075	0,090	0,094	0,093	0,087	0,096	0,102	0,107	0,090	0,096	0,106	0,104	0,089
<b>P10</b>	0,139	0,145	0,147	0,129	0,149	0,158	0,163	0,155	0,162	0,192	0,200	0,177	0,164	0,208	0,189	0,166
<b>P11</b>	0,188	0,189	0,182	0,164	0,197	0,229	0,237	0,229	0,197	0,238	0,253	0,268	0,188	0,245	0,250	0,273
<b>P12</b>	0,084	0,082	0,085	0,084	0,115	0,108	0,123	0,129	0,100	0,098	0,110	0,113	0,108	0,104	0,107	0,110
<b>P13</b>	0,132	0,130	0,138	0,135	0,137	0,125	0,136	0,135	0,113	0,106	0,116	0,109	0,108	0,114	0,126	0,110
<b>P14</b>	0,165	0,150	0,157	0,188	0,183	0,214	0,187	0,218	0,173	0,191	0,188	0,212	0,172	0,214	0,224	0,233
<b>P15</b>	0,143	0,155	0,154	0,131	0,152	0,171	0,194	0,204	0,144	0,137	0,140	0,146	0,141	0,164	0,154	0,149
<b>P16</b>	0,117	0,107	0,102	0,077	0,149	0,147	0,152	0,132	0,133	0,136	0,117	0,091	0,118	0,127	0,107	0,092
<b>P17</b>	0,138	0,122	0,110	0,124	0,160	0,147	0,147	0,115	0,145	0,135	0,124	0,114	0,137	0,137	0,120	0,095
<b>P18</b>	0,201	0,199	0,163	0,181	0,191	0,193	0,165	0,151	0,204	0,231	0,225	0,198	0,174	0,190	0,165	0,130

Quadro 7 - Valores médios de  $f$  (Hz) para os cenários  $0^\circ$ ,  $+3^\circ$ ,  $+5^\circ$  e  $+7^\circ$ .

Ponto	$0^\circ$				$+3^\circ$				$+5^\circ$				$+7^\circ$			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>P1</b>	3,150	2,897	2,687	2,443	3,006	2,794	2,375	2,106	2,901	2,757	2,253	2,065	3,078	3,041	2,374	2,025
<b>P2</b>	1,194	1,139	1,074	1,044	1,264	1,205	1,164	1,146	1,322	1,269	1,181	1,165	1,284	1,218	1,156	1,146
<b>P3</b>	0,414	0,408	0,397	0,396	0,507	0,530	0,505	0,506	0,531	0,555	0,528	0,532	0,549	0,585	0,547	0,547
<b>P4</b>	3,466	3,410	3,236	3,150	3,664	3,495	3,160	2,953	3,836	3,620	3,207	2,979	3,752	3,562	3,195	3,018
<b>P5</b>	1,036	1,022	1,002	0,989	1,026	1,025	1,010	1,006	0,990	0,986	0,995	0,981	1,051	1,051	1,017	1,020
<b>P6</b>	6,357	5,982	5,396	4,823	6,639	6,285	5,415	4,928	7,233	6,625	5,596	4,888	6,972	6,381	5,541	4,838
<b>P7</b>	2,036	2,031	1,967	1,949	2,047	2,003	1,895	1,862	2,094	2,067	1,969	1,944	2,099	2,047	1,991	1,983
<b>P8</b>	2,637	2,619	2,524	2,498	2,642	2,627	2,560	2,529	2,632	2,612	2,534	2,472	2,645	2,646	2,605	2,517
<b>P9</b>	4,287	4,261	4,128	4,152	4,703	4,538	4,148	3,898	4,729	4,582	4,201	4,020	4,817	4,481	4,147	3,932
<b>P10</b>	1,470	1,463	1,444	1,424	1,436	1,420	1,408	1,411	1,450	1,467	1,437	1,438	1,473	1,464	1,432	1,426
<b>P11</b>	0,864	0,862	0,849	0,851	0,852	0,852	0,849	0,844	0,866	0,877	0,860	0,854	0,856	0,893	0,843	0,835
<b>P12</b>	6,550	6,326	6,205	6,123	7,437	6,736	6,624	6,263	6,986	6,610	6,375	6,001	7,522	6,816	6,523	6,039
<b>P13</b>	3,604	3,570	3,507	3,479	3,742	3,644	3,513	3,487	3,837	3,774	3,690	3,675	3,696	3,657	3,654	3,646
<b>P14</b>	1,862	1,839	1,880	1,837	1,963	1,911	1,845	1,866	2,007	1,958	1,884	1,892	1,898	1,918	1,831	1,836
<b>P15</b>	11,819	11,336	10,260	8,260	15,643	12,965	13,085	12,365	11,599	10,543	9,423	8,858	10,629	10,833	9,229	8,725
<b>P16</b>	8,357	7,734	7,529	7,117	9,082	8,325	8,457	7,917	8,317	8,095	7,652	7,274	7,758	7,463	7,089	7,107
<b>P17</b>	4,955	4,844	4,819	4,766	5,376	4,944	5,051	4,892	5,208	4,854	4,780	4,700	4,968	4,866	4,820	4,855
<b>P18</b>	2,917	2,914	2,946	2,888	2,994	2,915	2,949	2,889	2,876	2,869	2,804	2,832	2,957	2,931	2,852	2,920

Quadro 8 - Desvios padrões de  $f$  (Hz) para os cenários  $0^\circ$ ,  $+3^\circ$ ,  $+5^\circ$  e  $+7^\circ$ .

Ponto	$0^\circ$				$+3^\circ$				$+5^\circ$				$+7^\circ$			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>P1</b>	3,118	2,484	2,735	2,563	2,065	1,808	1,914	2,237	2,630	2,765	2,577	2,618	2,320	1,718	2,272	1,766
<b>P2</b>	0,814	0,525	0,491	0,739	0,701	0,718	0,780	0,374	0,564	0,557	0,419	0,390	0,800	0,710	0,642	0,545
<b>P3</b>	0,583	0,469	0,390	0,377	0,473	0,397	0,381	0,365	0,355	0,352	0,333	0,321	0,443	0,394	0,375	0,374
<b>P4</b>	1,790	1,735	1,673	1,430	2,183	1,989	1,312	0,931	2,207	1,777	1,248	0,953	2,356	2,349	1,816	1,276
<b>P5</b>	0,562	0,526	0,501	0,441	0,746	0,626	0,304	0,291	0,623	0,487	0,346	0,318	1,143	0,441	0,357	0,361
<b>P6</b>	3,265	2,786	2,372	2,257	2,948	2,759	1,905	1,606	3,191	2,886	2,376	1,723	3,033	4,464	2,274	1,708
<b>P7</b>	0,993	0,998	0,713	0,652	0,932	0,919	0,786	0,755	0,914	0,995	0,734	0,763	0,959	1,007	0,709	0,676
<b>P8</b>	1,058	1,095	0,921	0,876	1,006	1,029	0,859	0,858	1,031	1,016	0,861	0,796	2,818	0,948	0,867	0,793
<b>P9</b>	3,128	1,256	0,742	0,832	1,384	0,971	0,720	0,673	2,571	1,315	0,907	0,860	1,216	0,900	0,977	0,858
<b>P10</b>	0,767	0,720	0,716	0,749	0,715	0,692	0,615	0,586	1,108	1,039	1,072	0,857	0,861	0,792	0,749	0,668
<b>P11</b>	0,903	0,966	0,714	0,529	0,828	0,777	0,640	0,591	0,912	0,776	0,535	0,516	1,147	0,569	0,533	0,467
<b>P12</b>	3,996	2,905	3,763	1,607	2,251	3,405	3,379	1,451	2,529	4,337	3,791	1,824	2,431	2,262	1,600	1,246
<b>P13</b>	1,344	1,287	1,111	1,005	1,302	1,273	1,025	0,998	1,994	1,389	1,250	1,109	1,970	1,083	0,969	0,905
<b>P14</b>	0,913	1,119	0,846	0,773	3,461	1,339	1,158	0,870	2,082	1,509	1,100	0,964	7,370	1,164	1,044	0,869
<b>P15</b>	9,705	8,794	8,439	4,564	10,142	8,674	6,533	4,724	8,080	6,646	7,130	11,217	6,212	7,058	5,607	4,837
<b>P16</b>	3,582	3,190	2,416	2,835	2,579	2,824	2,945	2,029	3,427	3,683	2,798	2,080	5,719	4,964	3,666	2,673
<b>P17</b>	2,348	1,969	1,541	1,413	1,700	1,662	1,476	1,283	3,204	1,919	1,464	1,191	1,827	1,637	1,411	1,248
<b>P18</b>	1,672	1,547	1,187	1,083	1,225	1,192	1,154	1,110	1,682	1,410	1,417	1,424	2,125	2,264	1,348	0,999

Quadro 9 - Valores médios de  $R_{GB}$  (-) para os cenários  $0^\circ$ ,  $+3^\circ$ ,  $+5^\circ$  e  $+7^\circ$ .

Ponto	$0^\circ$				$+3^\circ$				$+5^\circ$				$+7^\circ$			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>P1</b>	0,360	0,384	0,408	0,410	0,325	0,426	0,461	0,489	0,336	0,446	0,480	0,509	0,314	0,455	0,491	0,520
<b>P2</b>	0,511	0,522	0,542	0,550	0,508	0,561	0,580	0,595	0,503	0,592	0,605	0,613	0,507	0,622	0,623	0,629
<b>P3</b>	0,556	0,572	0,604	0,624	0,624	0,670	0,680	0,692	0,625	0,688	0,696	0,708	0,626	0,684	0,713	0,718
<b>P4</b>	0,447	0,459	0,471	0,489	0,440	0,464	0,486	0,511	0,438	0,461	0,489	0,513	0,429	0,471	0,497	0,517
<b>P5</b>	0,606	0,609	0,632	0,649	0,620	0,633	0,638	0,656	0,625	0,651	0,653	0,664	0,619	0,654	0,657	0,672
<b>P6</b>	0,365	0,383	0,408	0,439	0,358	0,380	0,402	0,432	0,340	0,378	0,401	0,438	0,353	0,396	0,413	0,449
<b>P7</b>	0,534	0,538	0,555	0,574	0,541	0,554	0,573	0,593	0,532	0,565	0,580	0,593	0,534	0,581	0,587	0,599
<b>P8</b>	0,520	0,526	0,536	0,549	0,527	0,538	0,550	0,568	0,523	0,544	0,552	0,572	0,518	0,547	0,554	0,574
<b>P9</b>	0,438	0,449	0,464	0,477	0,426	0,449	0,461	0,486	0,427	0,451	0,462	0,490	0,425	0,468	0,474	0,501
<b>P10</b>	0,589	0,592	0,609	0,625	0,599	0,609	0,619	0,641	0,591	0,608	0,615	0,632	0,588	0,622	0,626	0,642
<b>P11</b>	0,633	0,636	0,659	0,671	0,645	0,645	0,662	0,674	0,651	0,661	0,672	0,688	0,654	0,673	0,684	0,693
<b>P12</b>	0,423	0,444	0,469	0,497	0,401	0,436	0,455	0,481	0,408	0,439	0,464	0,489	0,394	0,444	0,469	0,507
<b>P13</b>	0,518	0,529	0,553	0,576	0,493	0,525	0,548	0,574	0,494	0,525	0,552	0,577	0,506	0,538	0,562	0,586
<b>P14</b>	0,594	0,596	0,619	0,634	0,573	0,585	0,622	0,643	0,565	0,590	0,625	0,648	0,567	0,588	0,624	0,647
<b>P15</b>	0,425	0,459	0,485	0,554	0,391	0,461	0,477	0,520	0,437	0,492	0,543	0,575	0,457	0,493	0,531	0,535
<b>P16</b>	0,447	0,487	0,518	0,567	0,433	0,484	0,513	0,542	0,431	0,460	0,494	0,541	0,447	0,498	0,517	0,556
<b>P17</b>	0,515	0,531	0,566	0,609	0,490	0,539	0,562	0,610	0,487	0,544	0,571	0,617	0,499	0,552	0,576	0,628
<b>P18</b>	0,588	0,594	0,622	0,654	0,566	0,591	0,614	0,652	0,573	0,589	0,618	0,656	0,567	0,595	0,623	0,660

Quadro 10 - Desvios padrões de RGB (-) para os cenários 0°, +3°, +5° e +7°.

Ponto	0°				+3°				+5°				+7°			
	S1	S2	S3	S4												
<b>P1</b>	0,105	0,098	0,105	0,101	0,080	0,067	0,059	0,061	0,073	0,067	0,056	0,055	0,088	0,069	0,063	0,058
<b>P2</b>	0,052	0,040	0,044	0,049	0,070	0,058	0,055	0,051	0,073	0,051	0,040	0,042	0,077	0,043	0,041	0,039
<b>P3</b>	0,070	0,052	0,052	0,054	0,029	0,045	0,026	0,028	0,033	0,083	0,036	0,036	0,038	0,096	0,045	0,048
<b>P4</b>	0,051	0,047	0,046	0,038	0,057	0,053	0,045	0,040	0,060	0,074	0,048	0,048	0,060	0,059	0,044	0,042
<b>P5</b>	0,038	0,037	0,040	0,038	0,046	0,052	0,049	0,052	0,047	0,059	0,047	0,047	0,060	0,078	0,050	0,045
<b>P6</b>	0,042	0,040	0,036	0,034	0,045	0,046	0,037	0,036	0,055	0,041	0,041	0,034	0,044	0,040	0,037	0,034
<b>P7</b>	0,044	0,044	0,044	0,046	0,058	0,054	0,048	0,043	0,062	0,052	0,043	0,039	0,057	0,042	0,034	0,032
<b>P8</b>	0,043	0,040	0,043	0,042	0,041	0,041	0,041	0,038	0,041	0,038	0,050	0,037	0,041	0,057	0,046	0,038
<b>P9</b>	0,035	0,042	0,026	0,038	0,043	0,041	0,040	0,037	0,045	0,042	0,055	0,047	0,044	0,041	0,045	0,036
<b>P10</b>	0,042	0,042	0,044	0,041	0,045	0,043	0,048	0,045	0,061	0,071	0,085	0,071	0,064	0,069	0,063	0,044
<b>P11</b>	0,053	0,049	0,044	0,038	0,056	0,050	0,049	0,060	0,049	0,060	0,039	0,038	0,042	0,052	0,041	0,038
<b>P12</b>	0,039	0,028	0,033	0,036	0,065	0,051	0,056	0,060	0,045	0,038	0,045	0,051	0,067	0,039	0,043	0,037
<b>P13</b>	0,038	0,034	0,034	0,031	0,063	0,036	0,035	0,033	0,055	0,035	0,034	0,032	0,039	0,036	0,030	0,029
<b>P14</b>	0,040	0,039	0,032	0,034	0,087	0,076	0,040	0,037	0,104	0,077	0,036	0,035	0,101	0,101	0,059	0,042
<b>P15</b>	0,051	0,054	0,048	0,032	0,087	0,070	0,072	0,066	0,048	0,042	0,035	0,037	0,034	0,051	0,036	0,047
<b>P16</b>	0,052	0,033	0,040	0,033	0,068	0,054	0,049	0,063	0,061	0,066	0,052	0,049	0,045	0,040	0,039	0,052
<b>P17</b>	0,046	0,035	0,036	0,029	0,069	0,041	0,045	0,036	0,074	0,036	0,032	0,031	0,051	0,031	0,030	0,029
<b>P18</b>	0,038	0,036	0,034	0,029	0,058	0,041	0,040	0,032	0,040	0,043	0,036	0,029	0,054	0,041	0,040	0,031

## D.2 DESCENDENTE

Quadro 11 - Valores médios de  $V_B$  (m/s) para os cenários  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ .

Ponto	$0^\circ$				$-3^\circ$				$-5^\circ$				$-7^\circ$			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>P1</b>	1,102	1,115	1,176	1,142	1,124	0,936	-	-	1,113	0,664	-	-	1,165	0,886	0,735	1,189
<b>P2</b>	1,145	1,150	1,211	1,199	1,147	1,147	-	-	1,147	0,574	-	-	1,163	-	-	1,187
<b>P3</b>	1,127	1,138	1,234	1,216	1,136	1,155	-	-	1,144	1,122	-	-	1,164	1,013	-	1,198
<b>P4</b>	1,697	1,722	1,860	1,866	1,710	1,673	1,813	1,819	1,689	1,661	1,686	1,684	1,691	1,643	-	1,906
<b>P5</b>	1,707	1,738	1,855	1,880	1,701	1,691	1,827	1,860	1,676	1,720	-	-	1,691	1,711	-	1,872
<b>P6</b>	2,321	2,354	2,580	2,590	2,302	2,362	2,552	2,592	2,312	2,335	2,439	2,504	2,321	2,333	2,433	2,481
<b>P7</b>	1,693	1,740	1,865	1,901	1,713	1,688	1,837	1,868	1,688	1,681	1,743	-	1,702	1,673	-	1,861
<b>P8</b>	2,313	2,390	2,625	2,632	2,284	2,351	2,550	2,611	2,295	2,312	2,526	2,564	2,299	2,269	2,487	2,534
<b>P9</b>	2,313	2,382	2,589	2,644	2,281	2,337	2,574	2,607	2,300	2,321	2,502	2,570	2,318	2,303	2,476	2,534
<b>P10</b>	2,322	2,421	2,622	2,672	2,295	2,379	2,556	2,586	2,285	2,305	2,519	2,531	2,270	2,277	2,494	2,458
<b>P11</b>	2,325	2,368	2,546	2,599	2,276	2,341	2,515	2,556	2,276	2,299	2,489	2,531	2,266	2,240	2,471	2,473
<b>P12</b>	3,444	3,625	3,788	4,093	3,259	3,602	3,790	3,957	3,383	3,644	3,782	3,876	3,336	3,612	3,761	3,860
<b>P13</b>	3,372	3,666	3,825	4,309	3,102	3,647	3,831	4,178	3,239	3,656	3,820	4,142	3,162	3,621	3,886	4,249
<b>P14</b>	3,484	3,672	3,803	4,473	3,217	3,682	3,826	4,188	3,196	3,593	3,799	4,153	3,062	3,644	3,817	4,143
<b>P15</b>	4,863	5,119	5,565	5,766	4,258	4,973	5,289	5,798	4,412	4,952	5,312	5,850	4,274	5,019	5,430	5,778
<b>P16</b>	4,504	5,171	5,416	5,840	4,303	5,110	5,313	5,706	4,259	5,015	5,192	5,881	4,411	5,099	5,218	5,736
<b>P17</b>	4,635	5,163	5,512	6,186	4,336	5,141	5,536	6,111	4,410	5,174	5,451	5,936	4,445	5,098	5,355	5,996
<b>P18</b>	4,772	5,167	5,564	6,287	4,278	5,204	5,582	6,234	4,311	5,205	5,300	5,982	4,260	5,121	5,207	6,012

Quadro 12 - Desvios padrões de  $V_B$  (m/s) para os cenários  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ .

Ponto	$0^\circ$				$-3^\circ$				$-5^\circ$				$-7^\circ$			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>P1</b>	0,058	0,055	0,051	0,050	0,047	0,069	-	-	0,031	0,224	-	-	0,019	0,218	0,138	0,049
<b>P2</b>	0,037	0,038	0,035	0,036	0,042	0,035	-	-	0,023	0,235	-	-	0,020	-	-	0,027
<b>P3</b>	0,047	0,049	0,040	0,045	0,026	0,066	-	-	0,038	0,033	-	-	0,043	0,068	-	0,089
<b>P4</b>	0,057	0,087	0,074	0,063	0,072	0,110	0,079	0,087	0,026	0,145	0,233	0,262	0,019	0,210	-	0,028
<b>P5</b>	0,079	0,080	0,075	0,071	0,071	0,118	0,083	0,072	0,102	0,134	-	-	0,047	0,098	-	0,096
<b>P6</b>	0,069	0,056	0,173	0,159	0,092	0,160	0,231	0,177	0,087	0,162	0,178	0,192	0,101	0,185	0,215	0,209
<b>P7</b>	0,044	0,073	0,071	0,040	0,072	0,109	0,068	0,071	0,036	0,089	0,555	-	0,048	0,136	-	0,070
<b>P8</b>	0,072	0,103	0,188	0,180	0,141	0,178	0,227	0,182	0,127	0,255	0,214	0,195	0,162	0,269	0,237	0,212
<b>P9</b>	0,125	0,149	0,181	0,173	0,122	0,200	0,228	0,174	0,097	0,147	0,168	0,168	0,119	0,219	0,212	0,190
<b>P10</b>	0,154	0,184	0,200	0,179	0,130	0,233	0,278	0,231	0,119	0,277	0,206	0,221	0,150	0,285	0,253	0,318
<b>P11</b>	0,146	0,177	0,236	0,202	0,145	0,247	0,251	0,230	0,148	0,227	0,218	0,202	0,171	0,280	0,273	0,296
<b>P12</b>	0,368	0,400	0,576	0,771	0,530	0,416	0,571	0,814	0,402	0,447	0,176	0,461	0,451	0,571	0,624	0,328
<b>P13</b>	0,512	0,436	0,801	0,951	0,573	0,438	0,763	0,915	0,562	0,473	0,557	0,864	0,611	0,588	0,660	0,908
<b>P14</b>	0,373	0,520	0,617	0,874	0,491	0,534	0,715	0,866	0,606	0,652	0,572	0,838	0,659	0,588	0,555	0,904
<b>P15</b>	0,829	0,711	0,353	0,394	1,122	0,942	0,909	1,113	1,154	0,924	0,528	0,681	0,993	0,914	0,705	0,815
<b>P16</b>	0,990	0,709	0,728	0,567	1,036	0,842	1,105	0,996	1,013	0,972	0,726	1,141	1,013	1,116	1,145	1,162
<b>P17</b>	1,025	0,812	0,905	1,557	1,082	0,895	1,279	1,227	1,034	1,003	0,651	1,195	0,982	1,132	1,237	1,425
<b>P18</b>	0,933	0,881	1,006	1,544	1,110	1,007	1,027	1,531	1,135	0,950	0,768	1,083	1,081	1,234	1,368	1,281

Quadro 13 - Valores médios de  $L_B$  (m) para os cenários 0°, -3°, -5° e -7°.

Ponto	0°				-3°				-5°				-7°			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>P1</b>	0,168	0,177	0,190	0,212	0,188	19,696	-	-	0,180	5,320	-	-	0,205	4,181	2,270	0,483
<b>P2</b>	0,607	0,632	0,702	0,736	0,603	17,012	-	-	0,617	0,344	-	-	0,608	-	-	0,732
<b>P3</b>	2,092	2,147	2,406	2,385	1,897	5,860	-	-	2,058	30,109	-	-	2,007	36,938	-	2,645
<b>P4</b>	0,236	0,243	0,284	0,302	0,284	0,255	0,402	0,381	0,235	0,359	6,181	7,964	0,241	2,051	-	0,281
<b>P5</b>	1,278	1,317	1,436	1,490	1,327	1,395	1,579	1,652	1,325	2,133	-	-	1,323	6,443	-	1,542
<b>P6</b>	0,155	0,167	0,209	0,241	0,154	0,173	0,213	0,240	0,151	0,172	0,208	0,232	0,161	0,191	0,255	0,257
<b>P7</b>	0,528	0,546	0,612	0,639	0,513	0,544	0,777	0,740	0,511	1,037	52,507	-	0,513	13,248	-	0,572
<b>P8</b>	0,574	0,601	0,704	0,739	0,572	0,615	0,693	0,747	0,585	0,625	0,701	0,727	0,570	0,621	0,737	0,692
<b>P9</b>	0,286	0,298	0,344	0,375	0,272	0,290	0,346	0,375	0,264	0,289	0,339	0,359	0,274	0,322	0,383	0,358
<b>P10</b>	1,229	1,291	1,442	1,495	1,227	1,312	1,474	1,512	1,211	1,280	1,455	1,530	1,205	1,281	1,536	1,450
<b>P11</b>	2,267	2,312	2,533	2,595	2,198	2,314	2,627	2,718	2,218	2,322	2,845	3,148	2,174	2,239	3,429	2,821
<b>P12</b>	0,277	0,301	0,341	0,402	0,242	0,285	0,342	0,394	0,253	0,300	0,350	0,390	0,256	0,302	0,356	0,384
<b>P13</b>	0,621	0,687	0,755	0,900	0,558	0,672	0,738	0,843	0,590	0,702	0,756	0,879	0,582	0,702	0,778	0,877
<b>P14</b>	1,505	1,575	1,636	2,014	1,305	1,535	1,669	1,858	1,322	1,533	1,682	1,890	1,288	1,611	1,783	1,834
<b>P15</b>	0,141	0,149	0,203	0,256	0,122	0,139	0,176	0,267	0,132	0,147	0,206	0,304	0,125	0,136	0,171	0,235
<b>P16</b>	0,302	0,350	0,408	0,515	0,305	0,344	0,424	0,507	0,303	0,362	0,413	0,537	0,316	0,347	0,426	0,526
<b>P17</b>	0,626	0,713	0,799	0,976	0,589	0,695	0,832	0,990	0,598	0,718	0,802	0,937	0,608	0,694	0,784	0,934
<b>P18</b>	1,226	1,328	1,479	1,766	1,089	1,333	1,497	1,741	1,101	1,331	1,429	1,705	1,092	1,349	1,420	1,724

Quadro 14 - Desvios padrões de  $L_B$  (m) para os cenários  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ .

Ponto	$0^\circ$				$-3^\circ$				$-5^\circ$				$-7^\circ$			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>P1</b>	0,076	0,078	0,092	0,110	0,084	16,017	-	-	0,074	5,531	-	-	0,072	2,401	1,066	0,416
<b>P2</b>	0,225	0,228	0,252	0,262	0,206	15,252	-	-	0,186	0,245	-	-	0,217	-	-	0,374
<b>P3</b>	1,500	1,545	1,695	1,668	0,395	7,979	-	-	0,716	39,458	-	-	0,824	33,572	-	1,471
<b>P4</b>	0,066	0,070	0,074	0,070	0,143	0,103	0,260	0,225	0,077	0,260	3,487	2,748	0,092	1,519	-	0,214
<b>P5</b>	0,430	0,458	0,480	0,516	0,457	0,465	0,561	0,584	0,554	1,068	-	-	0,516	4,382	-	0,697
<b>P6</b>	0,047	0,048	0,056	0,062	0,050	0,049	0,058	0,061	0,043	0,054	0,064	0,066	0,045	0,086	0,113	0,074
<b>P7</b>	0,200	0,211	0,227	0,234	0,189	0,196	0,414	0,329	0,187	0,652	55,134	-	0,177	11,973	-	0,352
<b>P8</b>	0,195	0,206	0,239	0,243	0,181	0,194	0,222	0,224	0,195	0,201	0,227	0,224	0,182	0,184	0,231	0,229
<b>P9</b>	0,057	0,059	0,064	0,082	0,080	0,080	0,097	0,105	0,069	0,085	0,085	0,084	0,087	0,116	0,124	0,110
<b>P10</b>	0,438	0,490	0,566	0,563	0,428	0,456	0,597	0,624	0,440	0,488	0,550	0,573	0,448	0,459	0,568	0,599
<b>P11</b>	0,885	0,912	0,993	0,998	0,984	0,997	1,134	1,174	0,878	0,980	1,258	1,408	0,909	0,983	1,810	1,474
<b>P12</b>	0,071	0,070	0,087	0,112	0,092	0,088	0,109	0,139	0,098	0,092	0,097	0,115	0,102	0,099	0,117	0,104
<b>P13</b>	0,216	0,231	0,292	0,341	0,215	0,232	0,268	0,313	0,212	0,240	0,257	0,344	0,208	0,241	0,259	0,310
<b>P14</b>	0,574	0,578	0,643	0,858	0,577	0,713	0,741	0,851	0,582	0,694	0,676	0,848	0,620	0,726	0,758	0,971
<b>P15</b>	0,076	0,085	0,130	0,174	0,071	0,079	0,133	0,229	0,077	0,082	0,129	0,194	0,072	0,074	0,126	0,211
<b>P16</b>	0,127	0,124	0,150	0,174	0,133	0,140	0,170	0,194	0,129	0,135	0,133	0,183	0,135	0,151	0,166	0,185
<b>P17</b>	0,250	0,254	0,273	0,380	0,254	0,263	0,328	0,372	0,248	0,269	0,249	0,377	0,238	0,283	0,295	0,346
<b>P18</b>	0,522	0,510	0,572	0,734	0,499	0,566	0,652	0,751	0,515	0,555	0,571	0,720	0,476	0,636	0,628	0,761

Quadro 15 - Valores médios de  $L_s$  (m) para os cenários  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ .

Ponto	$0^\circ$				$-3^\circ$				$-5^\circ$				$-7^\circ$			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>P1</b>	0,183	0,209	0,248	0,256	0,175	0,506	-	-	0,159	0,062	-	-	0,184	0,170	1,255	0,616
<b>P2</b>	0,351	0,377	0,425	0,412	0,321	0,256	-	-	0,331	0,065	-	-	0,318	-	-	0,359
<b>P3</b>	0,616	0,647	0,719	0,680	0,530	0,124	-	-	0,582	0,146	-	-	0,546	1,112	-	0,462
<b>P4</b>	0,254	0,262	0,291	0,291	0,235	0,221	0,273	0,274	0,227	0,051	0,154	0,224	0,228	0,058	-	0,147
<b>P5</b>	0,370	0,385	0,414	0,412	0,386	0,341	0,363	0,351	0,392	0,189	-	-	0,387	0,178	-	0,404
<b>P6</b>	0,210	0,226	0,273	0,296	0,182	0,210	0,255	0,266	0,186	0,191	0,207	0,223	0,196	0,125	0,199	0,344
<b>P7</b>	0,303	0,312	0,337	0,337	0,274	0,250	0,290	0,307	0,284	0,115	0,107	-	0,280	0,085	-	0,284
<b>P8</b>	0,302	0,311	0,335	0,313	0,291	0,291	0,312	0,316	0,295	0,269	0,285	0,284	0,284	0,244	0,250	0,314
<b>P9</b>	0,254	0,261	0,282	0,261	0,229	0,243	0,273	0,270	0,232	0,218	0,237	0,254	0,234	0,173	0,220	0,290
<b>P10</b>	0,347	0,366	0,391	0,384	0,351	0,349	0,329	0,334	0,353	0,321	0,310	0,330	0,365	0,300	0,278	0,409
<b>P11</b>	0,421	0,434	0,461	0,462	0,422	0,373	0,369	0,381	0,432	0,342	0,317	0,359	0,439	0,302	0,258	0,528
<b>P12</b>	0,249	0,273	0,270	0,266	0,196	0,255	0,268	0,263	0,204	0,254	0,266	0,258	0,200	0,249	0,259	0,256
<b>P13</b>	0,312	0,339	0,339	0,344	0,270	0,303	0,308	0,310	0,292	0,310	0,315	0,317	0,276	0,292	0,305	0,314
<b>P14</b>	0,395	0,402	0,408	0,430	0,328	0,338	0,357	0,374	0,343	0,345	0,355	0,365	0,328	0,336	0,349	0,359
<b>P15</b>	0,269	0,304	0,339	0,444	0,242	0,310	0,333	0,375	0,255	0,314	0,327	0,377	0,236	0,327	0,357	0,320
<b>P16</b>	0,236	0,318	0,308	0,306	0,234	0,314	0,307	0,305	0,227	0,320	0,308	0,308	0,245	0,297	0,288	0,291
<b>P17</b>	0,314	0,352	0,343	0,326	0,283	0,354	0,344	0,313	0,303	0,355	0,341	0,270	0,292	0,348	0,329	0,306
<b>P18</b>	0,418	0,440	0,420	0,411	0,359	0,438	0,415	0,396	0,361	0,431	0,389	0,378	0,360	0,433	0,385	0,401

Quadro 16 - Desvios padrões de  $L_s$  (m) para os cenários  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ .

Ponto	$0^\circ$				$-3^\circ$				$-5^\circ$				$-7^\circ$			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>P1</b>	0,098	0,100	0,111	0,116	0,083	0,866	-	-	0,089	0,041	-	-	0,093	0,088	0,607	0,828
<b>P2</b>	0,144	0,140	0,142	0,131	0,134	0,575	-	-	0,125	0,051	-	-	0,123	-	-	0,125
<b>P3</b>	0,297	0,307	0,319	0,262	0,167	0,118	-	-	0,230	0,103	-	-	0,219	2,003	-	0,179
<b>P4</b>	0,083	0,085	0,082	0,076	0,100	0,110	0,098	0,091	0,097	0,063	0,127	0,139	0,103	0,075	-	0,089
<b>P5</b>	0,132	0,133	0,118	0,118	0,147	0,121	0,109	0,101	0,175	0,138	-	-	0,163	0,146	-	0,186
<b>P6</b>	0,097	0,099	0,111	0,097	0,088	0,092	0,097	0,092	0,085	0,095	0,101	0,094	0,092	0,106	0,138	0,114
<b>P7</b>	0,113	0,113	0,100	0,080	0,105	0,090	0,091	0,083	0,107	0,093	0,128	-	0,106	0,067	-	0,170
<b>P8</b>	0,106	0,110	0,102	0,089	0,105	0,101	0,099	0,088	0,112	0,102	0,092	0,079	0,106	0,100	0,097	0,103
<b>P9</b>	0,072	0,074	0,069	0,075	0,089	0,085	0,088	0,081	0,079	0,083	0,081	0,067	0,092	0,101	0,109	0,106
<b>P10</b>	0,139	0,145	0,147	0,129	0,138	0,124	0,130	0,123	0,144	0,131	0,106	0,101	0,163	0,140	0,123	0,162
<b>P11</b>	0,188	0,189	0,182	0,164	0,208	0,172	0,160	0,152	0,208	0,187	0,158	0,158	0,200	0,176	0,140	0,238
<b>P12</b>	0,084	0,082	0,085	0,084	0,102	0,097	0,098	0,099	0,106	0,093	0,083	0,078	0,109	0,099	0,092	0,077
<b>P13</b>	0,132	0,130	0,138	0,135	0,120	0,116	0,118	0,117	0,111	0,111	0,097	0,106	0,103	0,111	0,094	0,109
<b>P14</b>	0,165	0,150	0,157	0,188	0,156	0,167	0,165	0,167	0,164	0,178	0,142	0,137	0,183	0,195	0,147	0,196
<b>P15</b>	0,143	0,155	0,154	0,131	0,138	0,158	0,158	0,161	0,143	0,154	0,153	0,135	0,133	0,158	0,156	0,163
<b>P16</b>	0,117	0,107	0,102	0,077	0,116	0,128	0,114	0,095	0,114	0,119	0,095	0,097	0,125	0,136	0,108	0,095
<b>P17</b>	0,138	0,122	0,110	0,124	0,149	0,144	0,152	0,132	0,130	0,131	0,094	0,112	0,124	0,146	0,118	0,108
<b>P18</b>	0,201	0,199	0,163	0,181	0,160	0,185	0,179	0,142	0,173	0,174	0,158	0,139	0,157	0,209	0,163	0,161

Quadro 17 - Valores médios de  $f$  (Hz) para os cenários  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ .

Ponto	$0^\circ$				$-3^\circ$				$-5^\circ$				$-7^\circ$			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>P1</b>	3,150	2,897	2,687	2,443	3,087	1,956	-	-	3,279	0,109	-	-	3,279	0,109	-	-
<b>P2</b>	1,194	1,139	1,074	1,044	1,238	0,623	-	-	1,211	1,367	-	-	1,211	1,367	-	-
<b>P3</b>	0,414	0,408	0,397	0,396	0,469	0,335	-	-	0,433	0,265	-	-	0,433	0,265	-	-
<b>P4</b>	3,466	3,410	3,236	3,150	3,338	3,508	2,710	2,783	3,655	4,085	0,261	0,205	3,655	4,085	0,261	0,205
<b>P5</b>	1,036	1,022	1,002	0,989	0,993	0,972	0,942	0,930	0,976	0,738	-	-	0,976	0,738	-	-
<b>P6</b>	6,357	5,982	5,396	4,823	6,850	6,153	5,468	5,123	6,858	6,435	5,895	5,513	6,858	6,435	5,895	5,513
<b>P7</b>	2,036	2,031	1,967	1,949	2,175	2,125	1,722	1,795	2,123	1,451	0,039	-	2,123	1,451	0,039	-
<b>P8</b>	2,637	2,619	2,524	2,498	2,646	2,592	2,537	2,450	2,610	2,575	2,568	2,532	2,610	2,575	2,568	2,532
<b>P9</b>	4,287	4,261	4,128	4,152	4,566	4,373	4,168	4,038	4,633	4,586	4,342	4,205	4,633	4,586	4,342	4,205
<b>P10</b>	1,470	1,463	1,444	1,424	1,451	1,425	1,423	1,407	1,461	1,443	1,413	1,359	1,461	1,443	1,413	1,359
<b>P11</b>	0,864	0,862	0,849	0,851	0,873	0,869	0,840	0,825	0,859	0,862	0,790	0,725	0,859	0,862	0,790	0,725
<b>P12</b>	6,550	6,326	6,205	6,123	7,402	6,674	6,229	6,027	7,396	6,584	6,132	6,087	7,396	6,584	6,132	6,087
<b>P13</b>	3,604	3,570	3,507	3,479	3,789	3,761	3,670	3,633	3,667	3,615	3,525	3,465	3,667	3,615	3,525	3,465
<b>P14</b>	1,862	1,839	1,880	1,837	1,954	1,962	1,883	1,876	1,926	1,927	1,867	1,838	1,926	1,927	1,867	1,838
<b>P15</b>	11,819	11,336	10,260	8,260	11,664	11,072	10,391	9,056	11,365	10,737	9,948	8,629	11,365	10,737	9,948	8,629
<b>P16</b>	8,357	7,734	7,529	7,117	7,985	7,765	7,272	7,023	7,997	7,349	7,183	7,054	7,997	7,349	7,183	7,054
<b>P17</b>	4,955	4,844	4,819	4,766	4,971	4,881	4,730	4,682	4,921	4,830	4,764	4,945	4,921	4,830	4,764	4,945
<b>P18</b>	2,917	2,914	2,946	2,888	2,951	2,944	2,925	2,906	2,964	3,118	2,927	2,872	2,964	3,118	2,927	2,872

Quadro 18 - Desvios padrões de  $f$  (Hz) para os cenários  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$ ,  $-5^\circ$  e  $-7^\circ$ .

Ponto	$0^\circ$				$-3^\circ$				$-5^\circ$				$-7^\circ$			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>P1</b>	3,118	2,484	2,735	2,563	2,222	0,137	-	-	2,750	0,309	-	-	1,951	0,162	0,079	1,989
<b>P2</b>	0,814	0,525	0,491	0,739	1,122	0,097	-	-	0,863	6,102	-	-	0,806	-	-	1,336
<b>P3</b>	0,583	0,469	0,390	0,377	0,124	0,122	-	-	0,174	0,052	-	-	0,304	0,049	-	0,399
<b>P4</b>	1,790	1,735	1,673	1,430	2,322	3,357	1,146	1,335	2,164	5,691	0,957	0,049	2,154	0,921	-	3,527
<b>P5</b>	0,562	0,526	0,501	0,441	0,600	0,415	0,411	0,383	0,582	0,450	-	-	0,636	0,255	-	2,613
<b>P6</b>	3,265	2,786	2,372	2,257	3,631	3,026	1,961	1,732	3,045	4,166	3,285	3,313	3,361	4,701	3,555	1,191
<b>P7</b>	0,993	0,998	0,713	0,652	1,176	0,756	0,762	0,678	1,509	2,229	0,154	-	1,069	0,225	-	3,153
<b>P8</b>	1,058	1,095	0,921	0,876	0,941	0,897	0,855	0,909	1,001	0,903	0,836	0,767	1,856	0,773	0,754	0,804
<b>P9</b>	3,128	1,256	0,742	0,832	1,957	3,239	1,188	1,098	1,764	1,841	1,409	0,994	2,036	4,146	1,960	1,154
<b>P10</b>	0,767	0,720	0,716	0,749	0,929	0,668	2,441	1,491	0,932	0,911	0,865	0,656	0,779	0,754	0,542	0,620
<b>P11</b>	0,903	0,966	0,714	0,529	0,638	0,631	0,605	0,588	0,673	0,996	0,659	0,691	0,491	0,780	0,486	1,784
<b>P12</b>	3,996	2,905	3,763	1,607	6,536	2,503	1,944	3,496	7,182	2,370	1,747	1,540	5,149	4,166	3,741	2,895
<b>P13</b>	1,344	1,287	1,111	1,005	1,424	1,410	1,057	1,016	1,382	1,241	1,106	1,020	1,322	1,219	1,136	1,377
<b>P14</b>	0,913	1,119	0,846	0,773	1,774	2,013	1,022	0,946	1,508	1,783	1,082	1,005	1,949	4,091	0,930	2,469
<b>P15</b>	9,705	8,794	8,439	4,564	8,557	8,098	8,556	5,174	8,187	8,706	8,705	5,566	9,233	9,066	6,822	10,366
<b>P16</b>	3,582	3,190	2,416	2,835	4,580	4,107	2,821	2,419	4,889	2,943	3,504	1,911	5,584	4,346	3,441	1,814
<b>P17</b>	2,348	1,969	1,541	1,413	3,262	2,365	1,452	1,987	2,722	1,613	1,377	4,005	2,157	2,060	1,402	1,873
<b>P18</b>	1,672	1,547	1,187	1,083	1,328	1,237	1,190	1,185	1,715	1,390	1,426	1,370	1,307	1,273	1,293	1,091

Quadro 19 - Valores médios de  $R_{GB}$  (-) para os cenários 0°, -3°, -5° e -7°.

Ponto	0°				-3°				-5°				-7°			
	S1	S2	S3	S4												
<b>P1</b>	0,360	0,384	0,408	0,410	0,368	0,222	-	-	0,342	0,313	-	-	0,368	0,386	0,494	0,444
<b>P2</b>	0,511	0,522	0,542	0,550	0,520	0,380	-	-	0,499	0,471	-	-	0,513	-	-	0,495
<b>P3</b>	0,556	0,572	0,604	0,624	0,584	0,582	-	-	0,561	0,626	-	-	0,589	0,675	-	0,492
<b>P4</b>	0,447	0,459	0,471	0,489	0,424	0,417	0,420	0,441	0,431	0,234	0,222	0,227	0,441	0,271	-	0,369
<b>P5</b>	0,606	0,609	0,632	0,649	0,628	0,613	0,604	0,607	0,614	0,547	-	-	0,624	0,571	-	0,622
<b>P6</b>	0,365	0,383	0,408	0,439	0,358	0,369	0,392	0,410	0,363	0,343	0,336	0,357	0,373	0,285	0,308	0,450
<b>P7</b>	0,534	0,538	0,555	0,574	0,544	0,516	0,506	0,530	0,535	0,378	0,337	-	0,545	0,408	-	0,504
<b>P8</b>	0,520	0,526	0,536	0,549	0,528	0,519	0,529	0,546	0,526	0,509	0,509	0,527	0,530	0,513	0,497	0,551
<b>P9</b>	0,438	0,449	0,464	0,477	0,436	0,440	0,453	0,468	0,439	0,416	0,418	0,443	0,442	0,372	0,386	0,478
<b>P10</b>	0,589	0,592	0,609	0,625	0,604	0,598	0,582	0,594	0,595	0,590	0,575	0,599	0,613	0,604	0,581	0,628
<b>P11</b>	0,633	0,636	0,659	0,671	0,654	0,644	0,632	0,642	0,647	0,644	0,615	0,632	0,661	0,661	0,618	0,671
<b>P12</b>	0,423	0,444	0,469	0,497	0,414	0,427	0,449	0,482	0,411	0,423	0,445	0,470	0,414	0,429	0,449	0,483
<b>P13</b>	0,518	0,529	0,553	0,576	0,527	0,510	0,534	0,566	0,522	0,510	0,525	0,548	0,527	0,514	0,534	0,553
<b>P14</b>	0,594	0,596	0,619	0,634	0,587	0,580	0,598	0,625	0,590	0,587	0,591	0,610	0,592	0,590	0,600	0,593
<b>P15</b>	0,425	0,459	0,485	0,554	0,435	0,466	0,487	0,534	0,429	0,455	0,457	0,483	0,436	0,467	0,501	0,519
<b>P16</b>	0,447	0,487	0,518	0,567	0,458	0,483	0,504	0,570	0,446	0,479	0,501	0,539	0,457	0,474	0,501	0,558
<b>P17</b>	0,515	0,531	0,566	0,609	0,526	0,536	0,561	0,613	0,521	0,528	0,552	0,578	0,524	0,535	0,563	0,599
<b>P18</b>	0,588	0,594	0,622	0,654	0,593	0,592	0,610	0,656	0,588	0,592	0,603	0,640	0,593	0,600	0,616	0,644

Quadro 20 - Desvios padrões de  $R_{GB}$  (-) para os cenários 0°, -3°, -5° e -7°.

Ponto	0°				-3°				-5°				-7°			
	S1	S2	S3	S4												
<b>P1</b>	0,105	0,098	0,105	0,101	0,090	0,001	-	-	0,088	0,012	-	-	0,078	0,006	0,021	0,114
<b>P2</b>	0,052	0,040	0,044	0,049	0,072	0,010	-	-	0,060	0,080	-	-	0,079	-	-	0,072
<b>P3</b>	0,070	0,052	0,052	0,054	0,015	0,013	-	-	0,022	0,016	-	-	0,034	0,005	-	0,048
<b>P4</b>	0,051	0,047	0,046	0,038	0,071	0,099	0,071	0,069	0,056	0,099	0,017	0,004	0,057	0,031	-	0,087
<b>P5</b>	0,038	0,037	0,040	0,038	0,047	0,039	0,029	0,028	0,043	0,061	-	-	0,045	0,027	-	0,074
<b>P6</b>	0,042	0,040	0,036	0,034	0,063	0,048	0,037	0,036	0,041	0,066	0,076	0,064	0,046	0,085	0,082	0,041
<b>P7</b>	0,044	0,044	0,044	0,046	0,049	0,044	0,052	0,047	0,051	0,084	0,002	-	0,048	0,029	-	0,087
<b>P8</b>	0,043	0,040	0,043	0,042	0,040	0,038	0,037	0,037	0,039	0,043	0,039	0,037	0,049	0,043	0,040	0,042
<b>P9</b>	0,035	0,042	0,026	0,038	0,053	0,035	0,034	0,034	0,036	0,056	0,048	0,033	0,045	0,077	0,061	0,045
<b>P10</b>	0,042	0,042	0,044	0,041	0,045	0,039	0,074	0,089	0,053	0,050	0,047	0,035	0,043	0,053	0,035	0,046
<b>P11</b>	0,053	0,049	0,044	0,038	0,048	0,050	0,041	0,036	0,042	0,066	0,037	0,042	0,040	0,068	0,033	0,064
<b>P12</b>	0,039	0,028	0,033	0,036	0,068	0,035	0,035	0,041	0,071	0,033	0,032	0,030	0,079	0,038	0,035	0,037
<b>P13</b>	0,038	0,034	0,034	0,031	0,036	0,035	0,034	0,031	0,040	0,037	0,032	0,035	0,038	0,036	0,031	0,042
<b>P14</b>	0,040	0,039	0,032	0,034	0,061	0,074	0,044	0,037	0,049	0,058	0,040	0,040	0,067	0,069	0,040	0,116
<b>P15</b>	0,051	0,054	0,048	0,032	0,058	0,055	0,053	0,046	0,051	0,040	0,047	0,046	0,053	0,042	0,045	0,066
<b>P16</b>	0,052	0,033	0,040	0,033	0,058	0,044	0,041	0,040	0,064	0,031	0,034	0,035	0,057	0,051	0,039	0,036
<b>P17</b>	0,046	0,035	0,036	0,029	0,055	0,040	0,034	0,046	0,044	0,035	0,033	0,064	0,043	0,039	0,032	0,040
<b>P18</b>	0,038	0,036	0,034	0,029	0,040	0,038	0,035	0,031	0,042	0,038	0,037	0,031	0,039	0,038	0,036	0,032