

## 5 Resultados

Neste capítulo, os resultados obtidos, para o escoamento no regime de golfadas em uma tubulação horizontal com o Modelo de Dois Fluidos, são comparados com dois conjuntos de dados experimentais disponíveis na literatura. Nos trabalhos anteriores desenvolvido por Ortega (2004) e Carneiro (2006) a metodologia desenvolvida foi avaliada comparando com resultados numéricos de Issa e Kempf (2003) e Bonizzi (2003) para o escoamento no regime de golfadas em uma tubulação horizontal. Carneiro (2006) comparou os resultados obtidos com a presente metodologia com os dados experimentais de Al Safran et al. (2005), para uma tubulação em “V”. Apesar da comparação ter sido excelente, esta foi somente qualitativa pois por motivos de sigilo, os dados exatos não encontravam-se disponíveis. Através da presente comparação com dados experimentais, a metodologia pode ser considerada validada.

O primeiro trabalho selecionado para comparação foi desenvolvido por Ujang et al. (2006) e tem por objetivo avaliar a evolução da golfada ao longo da tubulação e a distribuição estatística do comprimento da golfada líquida, a qual será comparada com duas funções de probabilidade. O segundo trabalho foi desenvolvido por Fonseca (2009). Neste caso, avaliou-se a distribuição estatística dos principais parâmetros das golfadas em um ponto fixo da tubulação.

A mistura bifásica utilizada para os dois trabalhos comparados foi ar-água cujas propriedades físicas se encontra na Tabela 5.1

Tabela 5.1 - Propriedades dos Fluidos

Fluido	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (Pa-s)
Ar	1,225	$1,790 \times 10^{-5}$
Água	998,2	$1,003 \times 10^{-3}$

Para a definição da malha e do número de Courant a ser utilizado para cada caso, realizou-se um teste de malha que encontra-se no Apêndice A. Neste

Apêndice também encontra-se uma breve discussão do desempenho dos dois procedimentos de solução do sistema algébrico.

Carneiro (2006) investigou a influência do valor inicial e da entrada de  $\alpha_G$  e concluiu que para o regime estatisticamente permanente, este valor é irrelevante, concordando com observações de Issa e Kempf (2003). No entanto, o valor na entrada influencia na posição inicial de formação da golfada. Conseqüentemente, os valores numéricos obtidos com a simulação na região de entrada podem apresentar pior concordância com os dados experimentais.

## 5.1 Configuração 1

A primeira configuração a ser apresentada foi investigada experimentalmente por Ujang et al (2006). Foram selecionados três casos para serem testados, correspondendo a diferentes condições de contorno, i.e., diferentes combinações de velocidades superficiais do gás  $U_G$  e do líquido  $U_L$ , as quais são apresentadas na Tabela 5.2, ali também foi incluído o valor da velocidade de mistura ( $U_M = U_{sG} + U_{sL}$ ).

Para todos os casos desta configuração, o valor da fração volumétrica de gás na entrada foi especificado com igual a  $\alpha_G = 0,6$ .

A pressão na saída da tubulação foi mantida constante e igual à pressão atmosférica. A configuração geométrica utilizada consiste de um duto horizontal com  $L = 37$  m de comprimento e diâmetro  $D = 0,078$  m.

Tabela 5.2 - Condições Experimentais de Operação

Casos	$U_{sG}$ (m/s)	$U_{sL}$ (m/s)	$U_M$ (m/s)
1	2,36	0,41	2,77
2	2,55	0,61	3,16
3	4,64	0,61	5,25

A Figura 5.1 apresenta o mapa de padrões de escoamento correspondente à configuração selecionada, os três casos selecionados são indicados com o símbolo . Adicionalmente nesse mapa é traçada a curva que delimita as regiões de bem/mal estabelecimento das equações. Como mencionado no Capítulo 3, se o problema por mal posto, é impossível obter uma solução que seja independente dos parâmetros numéricos. Os dados que ficam abaixo da curva

são bem estabelecidos e os valores acima são mal estabelecidos

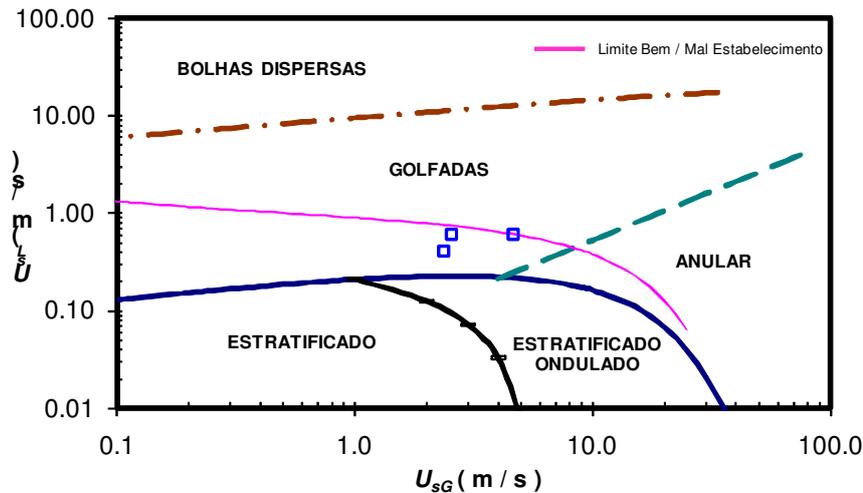


Figura 5.1 – Mapa de Padrões de Escoamento.

Pode-se observar da Fig. 5.1, que todos os casos realmente se enquadram no regime de golfadas, e que todos os casos são matematicamente bem postos, o que permite a obtenção da solução com a presente metodologia. Mesmo como o caso 3, ( $U_{sL} = 0,61$  m/s e  $U_{sG} = 4,64$  m/s) que encontra-se no limite da curva, foi possível obter solução estatisticamente permanente, independente dos parâmetros numéricos. As Figuras 5.2 a 5.4 apresentam a evolução do *hold-up* líquido ao longo da tubulação para diferentes instantes de tempo, isto é que cada curva corresponde a um instante de tempo diferente do perfil de *hold-up* (fração volumétrica do líquido), para cada um dos casos indicados na Tabela 5.2. Observou-se que após aproximadamente 100 s, foi possível considerar que o regime estatisticamente permanente foi obtido, e os resultados são apresentados somente após este instante.

Analisando as Figs. 5.2 a 5.4 pode-se observar claramente o comportamento randômico das golfadas, onde observa-se trens de golfadas se deslocando ao longo da tubulação, crescendo de tamanho e com frequência variável. Observa-se ainda que as golfadas começam a se formar após aproximadamente 7 m da entrada. Este comportamento é um reflexo das condições de contorno estabelecidas, como explicado anteriormente. Note que o Caso 1 com velocidade de mistura mais baixa apresenta baixa frequência de golfadas (Fig. 5.2). Do Caso 1 para o Caso 2, a velocidade superficial do gás é aproximadamente a mesma, mas a velocidade superficial do líquido cresce o que aumenta a frequência das golfadas (Fig. 5.3). Finalmente o Caso 3 apresenta uma velocidade superficial do gás mais elevada, resultando em golfadas menores (Fig. 5.4).

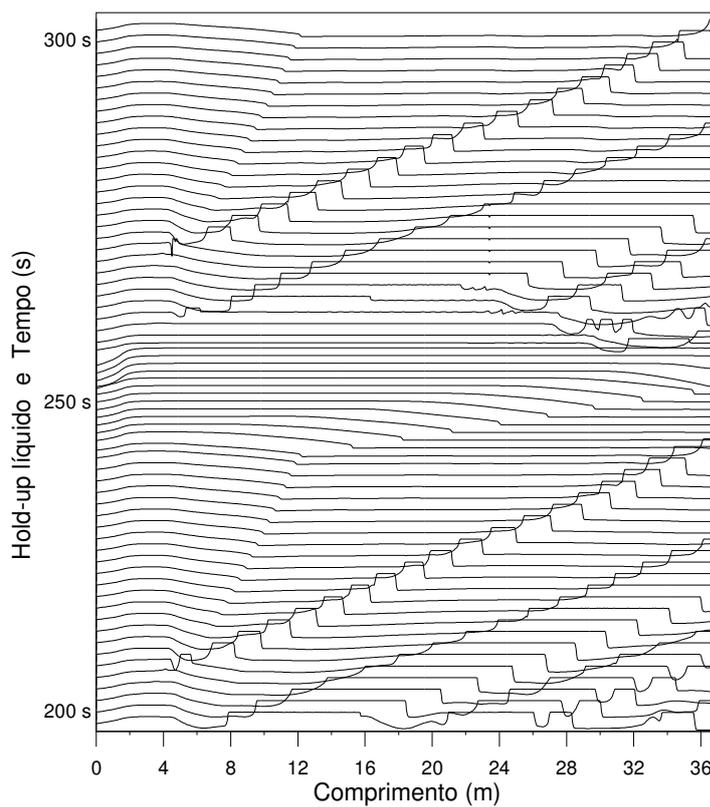


Figura 5.2 – Evolução do *Hold-up* Líquido em Espaço e Tempo.

Caso 1:  $U_{sL} = 0,41$  m/s e  $U_{sG} = 2,36$  m/s.

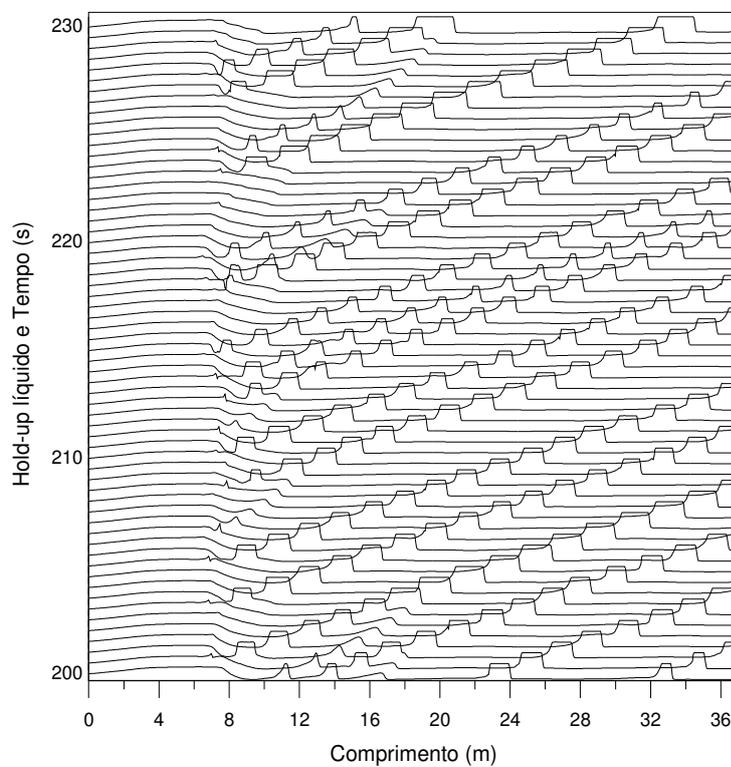


Figura 5.3 – Evolução do *Hold-up* Líquido em Espaço e Tempo.

Caso 2:  $U_{sL} = 0,61$  m/s e  $U_{sG} = 2,55$  m/s.

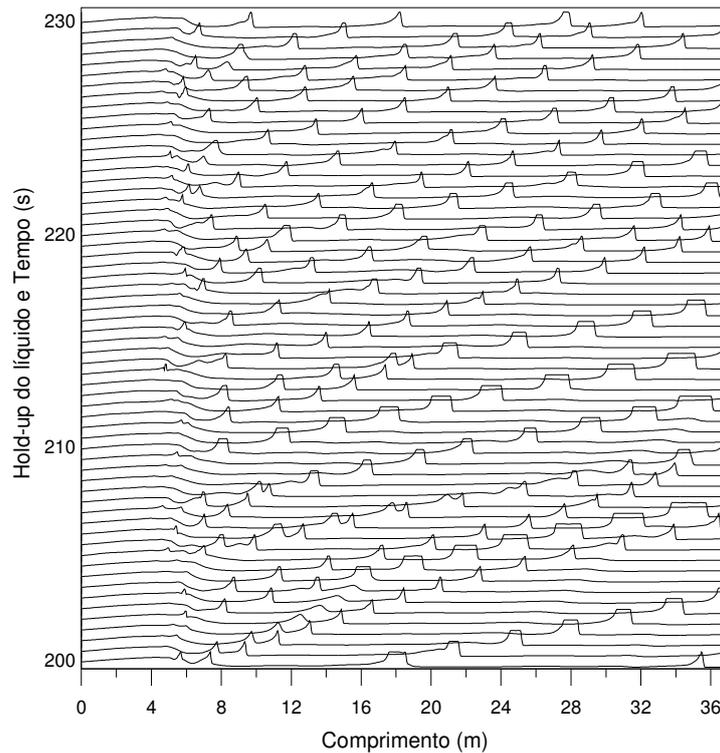


Figura 5.4 – Evolução do Hold-up Líquido em Espaço e Tempo.  
Caso 3:  $U_{sL} = 0,61$  m/s e  $U_{sG} = 4,64$  m/s.

As grandezas médias como comprimento da golfada, velocidade de translação e frequência, foram obtidas para o regime estatisticamente permanente, após o transiente inicial. Como indicado no Apêndice A, investigou-se o intervalo de tempo necessário de amostragem para avaliar as médias, e verificou-se como suficiente um intervalo de tempo de 300 s (após 100 s de simulação).

### 5.1.1 Comprimento das Golfadas

Nesta seção são apresentados histogramas do comprimento da golfada líquida. Para a determinação dos comprimentos das golfadas líquidas foram fixados cinco pontos de avaliação (7,00 m; 13,32 m; 20,57 m; 26,62 m e 34,55 m) ao longo da tubulação de acordo ao trabalho de Ujang et al. (2006).

Nas Figuras 5.5 a 5.7 apresentam-se para cada posição axial os resultados numéricos conjuntamente com os resultados experimentais, correspondentes a cada um dos casos. Para os três casos, observa-se claramente o caráter aleatório do escoamento, com uma grande gama de comprimentos, concordando com a literatura (Dukler e Hubbard, 1975; Fabre e Liné, 1992; Barnea e Taitel, 1993; Bonizzi, 2003).

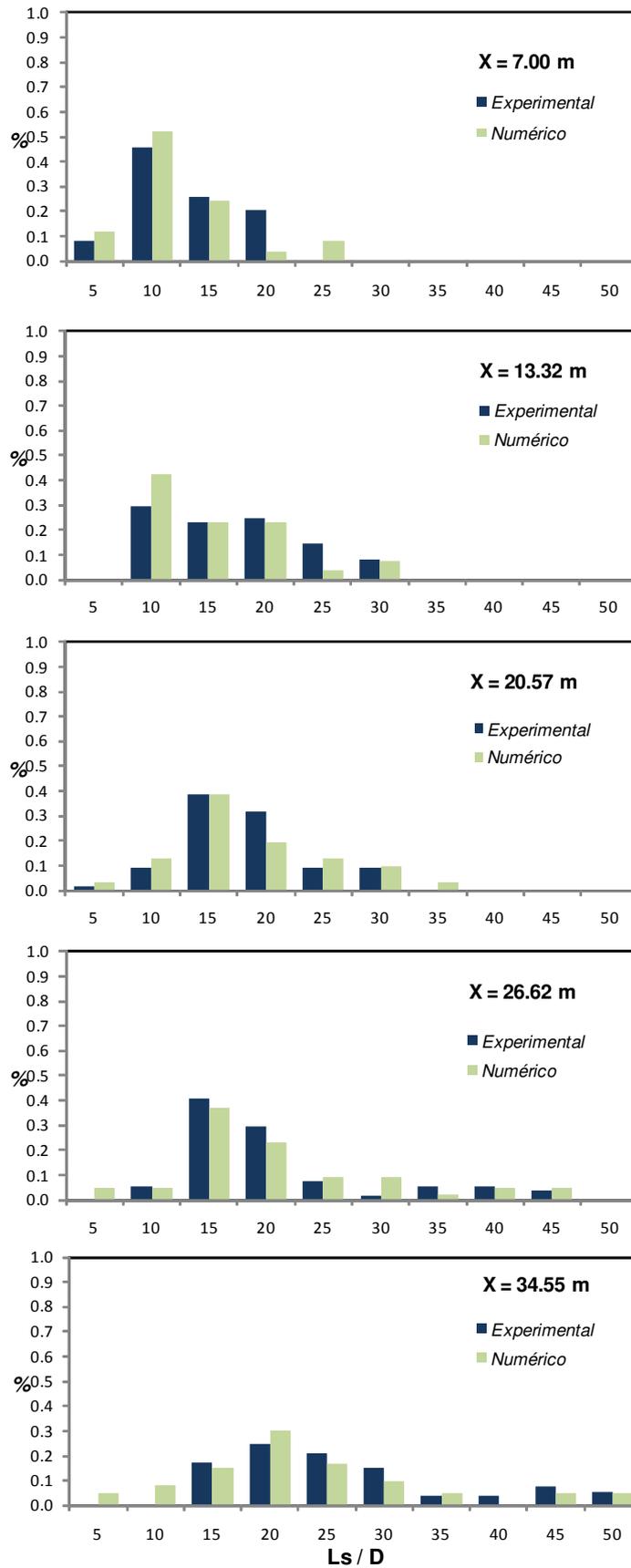


Figura 5.5 – Histograma do Comprimento das Golfadas ao Longo da Tubulação.  
 Caso 1:  $U_{sL} = 0,41$  m/s e  $U_{sG} = 2,36$  m/s.

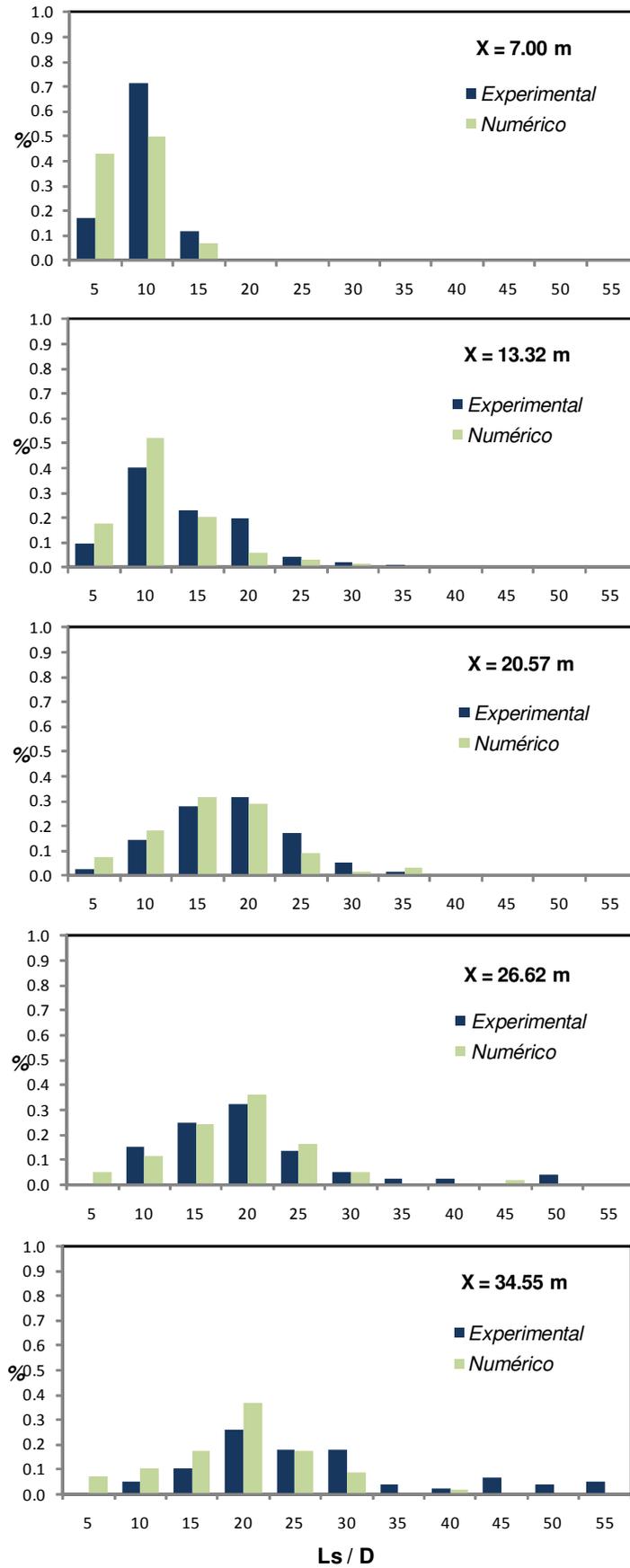


Figura 5.6 – Histograma do Comprimento das Golfadas ao Longo da Tubulação.

Caso 2:  $U_{sL} = 0,61$  m/s e  $U_{sG} = 2,55$  m/s.

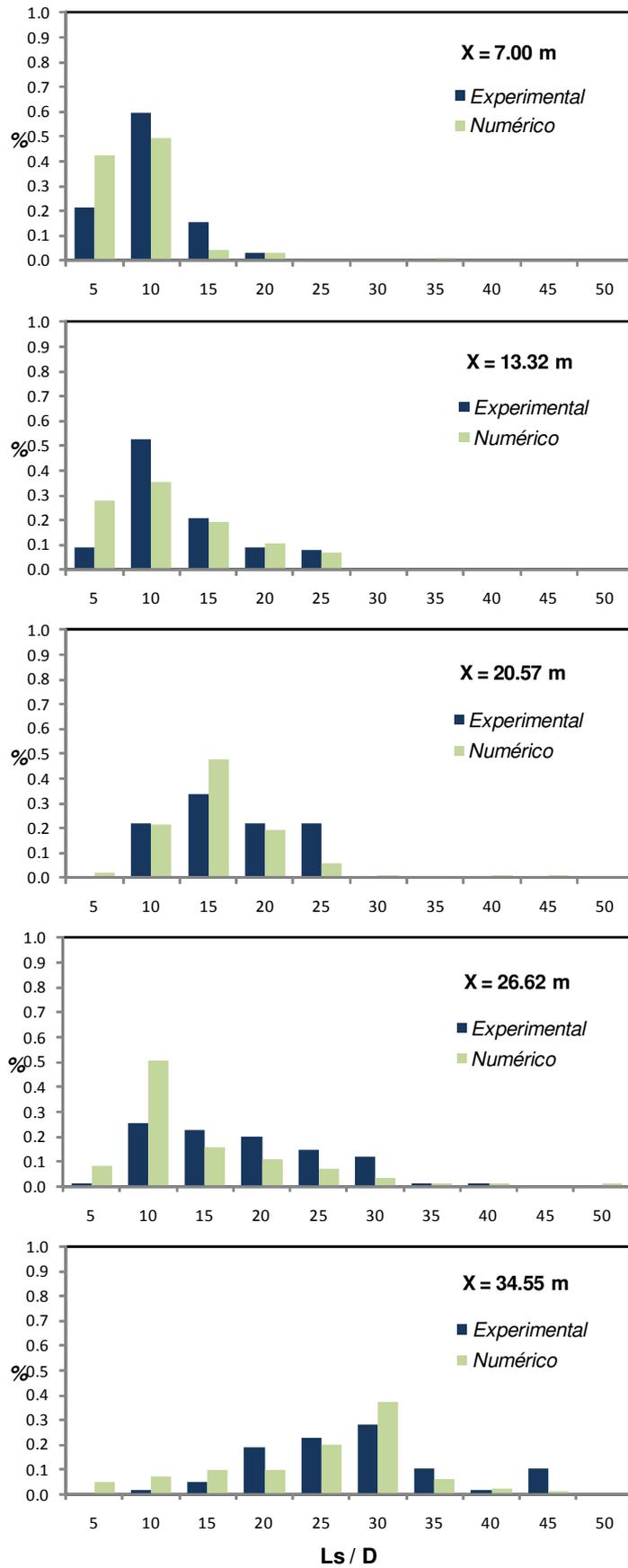


Figura 5.7 – Histograma do Comprimento das Golfadas ao Longo da Tubulação.

Caso 3:  $U_{sL} = 0,61$  m/s e  $U_{sG} = 4,64$  m/s.

Pode-se observar que para os três casos a distribuição prevista numericamente apresenta uma boa concordância dos histogramas. Para os três casos observa-se que as golfadas são menores próximo à entrada da tubulação, e crescem ao longo da mesma. Observa-se ainda um espalhamento maior de comprimentos nas coordenadas mais à jusante.

Na Tabela 5.3 apresenta-se uma comparação entre os valores numéricos e experimentais dos comprimentos médios das golfadas, para cada caso e em cada posição avaliada ao longo da tubulação. Observa-se uma excelente concordância entre os valores obtidos experimentalmente. Vale observar que os valores médios correspondentes aos dados de Ujang et al. (2006) são aproximados, pois foram obtidos a partir dos histogramas disponibilizados no referido trabalho. Como já mencionado, observa-se o aumento do comprimento da golfada para as coordenadas mais a jusante da entrada.

A Tabela 5.3 também apresenta o comprimento médio da golfada ao longo da tubulação, os quais encontram-se na faixa de  $14 - 20 L_S / D$ , concordando com outros resultados registrados na literatura (Dukler e Hubbard, 1975; Fabre e Liné, 1992). Os mesmos dados também encontram-se ilustrados na Fig.5.8. Pode-se observar que os dados numéricos apresentam a mesma tendência de variação ao longo do duto que os dados experimentais. A diferença entre os valores experimentais e numéricos para o comprimento médio das golfadas em toda a tubulação varia de 4,6% à 19,7%.

Tabela 5.3 - Comprimentos Médios das Golfadas em Cada Coordenada

x (m)	$L_S / D$					
	Caso 1		Caso2		Caso3	
	Numérico	Exp	Numérico	Exp	Numérico	Exp
7,00	12,61	12,91	7,65	9,71	8,27	12,79
13,32	15,70	17,46	10,83	14,00	11,88	13,99
20,57	19,88	18,24	16,51	18,36	16,68	17,21
26,62	20,43	20,83	18,28	20,44	14,54	18,77
34,55	23,11	26,73	18,95	27,40	25,06	28,07
$L_S/D$ Médio	18,35	19,23	14,44	17,98	15,29	17,31
Erro %	4,6		19,7		11,7	

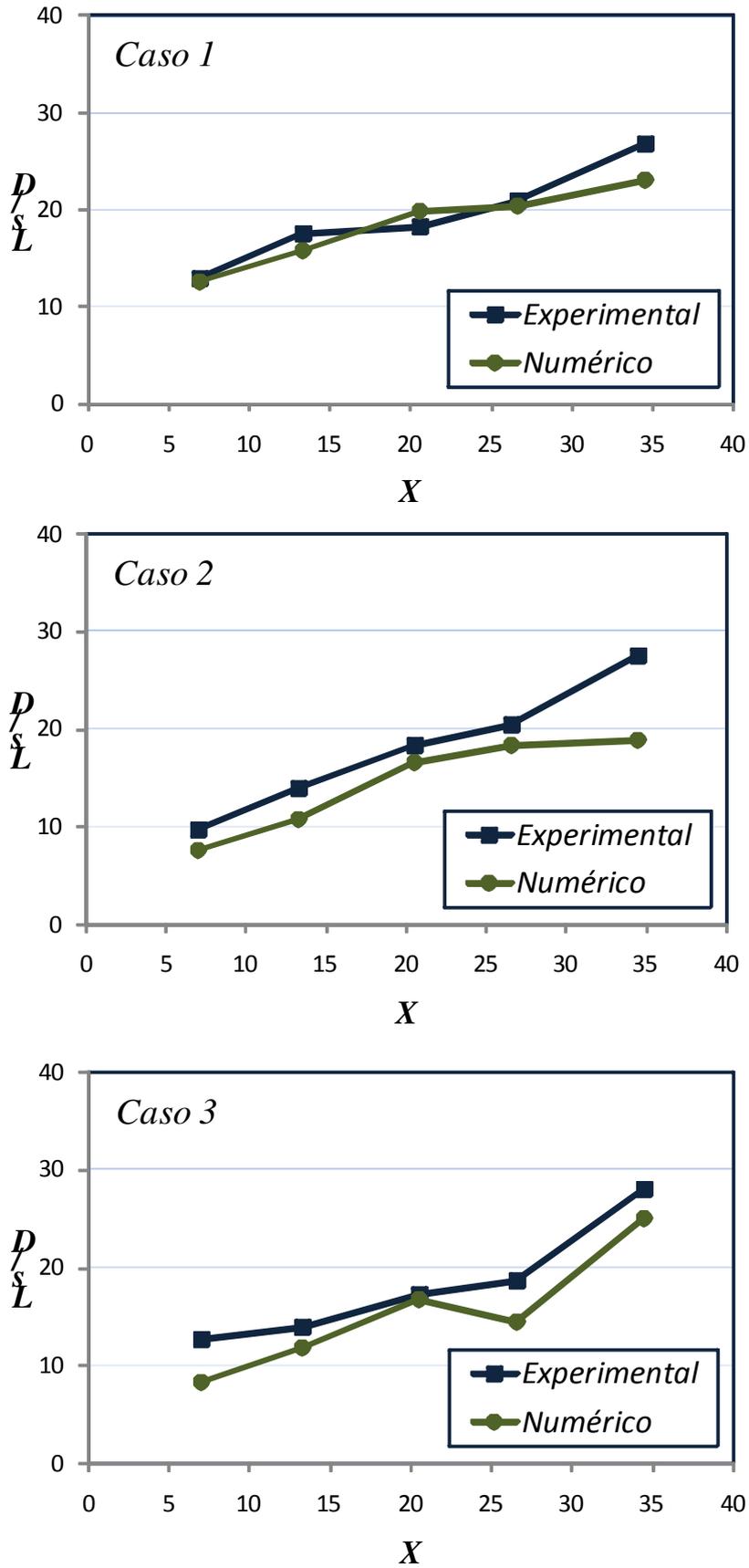


Figura 5.8 – Distribuição do Comprimento Médio das Golfadas ao Longo da Tubulação. Casos 1, 2 e 3.

Para melhor avaliar a distribuição dos comprimentos das golfadas, foi calculada a distribuição PDF dos comprimentos da golfada líquida ( $L_g/D$ ), utilizando-se os dados numéricos referentes a três posições da tubulação. Selecionou-se coordenadas onde o escoamento encontra-se totalmente desenvolvido (20,57 m; 26,62 m e 34,55 m). Para cada posição foram determinados os parâmetros de distribuição (média e desvio padrão) e a PDF foi ajustada com duas funções de distribuição: *normal* e *log-normal*.

Para a determinação do melhor modelo utilizou-se o conceito do erro-padrão de estimativa, o qual é uma medida de variabilidade da PDF para os valores fixos  $x$ . O melhor modelo é aquele que tem o menor erro-padrão. No trabalho de Ujang et al. (2006) utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov para a determinação do melhor ajuste. No entanto, no presente trabalho adotou-se a distribuição com menor erro-padrão, por parecer mais adequado, uma vez que considera todos os valores no cálculo e não apenas um único valor, como no teste de Kolmogorov-Smirnov.

Nas Figuras 5.9 a 5.11 apresenta-se as curvas PDF *normal* e *log-normal* calculadas a partir da média e desvio padrão dos dados numéricos, juntamente com os dados experimentais de Ujang et al. (2006) e os presentes dados numéricos, para os três casos investigados.

Observa-se que para as três posições ao longo da tubulação o Caso 1 apresenta uma distribuição que se aproxima razoavelmente bem de uma distribuição *log-normal*. Já para o Caso 2, a distribuição dos comprimentos é melhor representada por uma distribuição normal. Finalmente, observa-se que distribuição *log-normal* também representa muito bem a distribuição de comprimentos do Caso 3. Nota-se também uma concordância satisfatória com os dados experimentais.

Uma observação importante da análise estatística dos comprimentos é que apesar do caráter estocástico do escoamento este pode ser representado por uma curva de probabilidade seja *Normal* ou *log-normal* cuja única informação necessária é média e o desvio padrão da mesma.

A Tabela 5.4 apresenta o erro-padrão para as três posições para os três casos, e confirma as observações anteriores, i.e., o Caso 1 e 3 apresentam os menores erros para a distribuição *log-normal*, enquanto que para o Caso 2 a distribuição normal apresenta o menor erro-padrão.

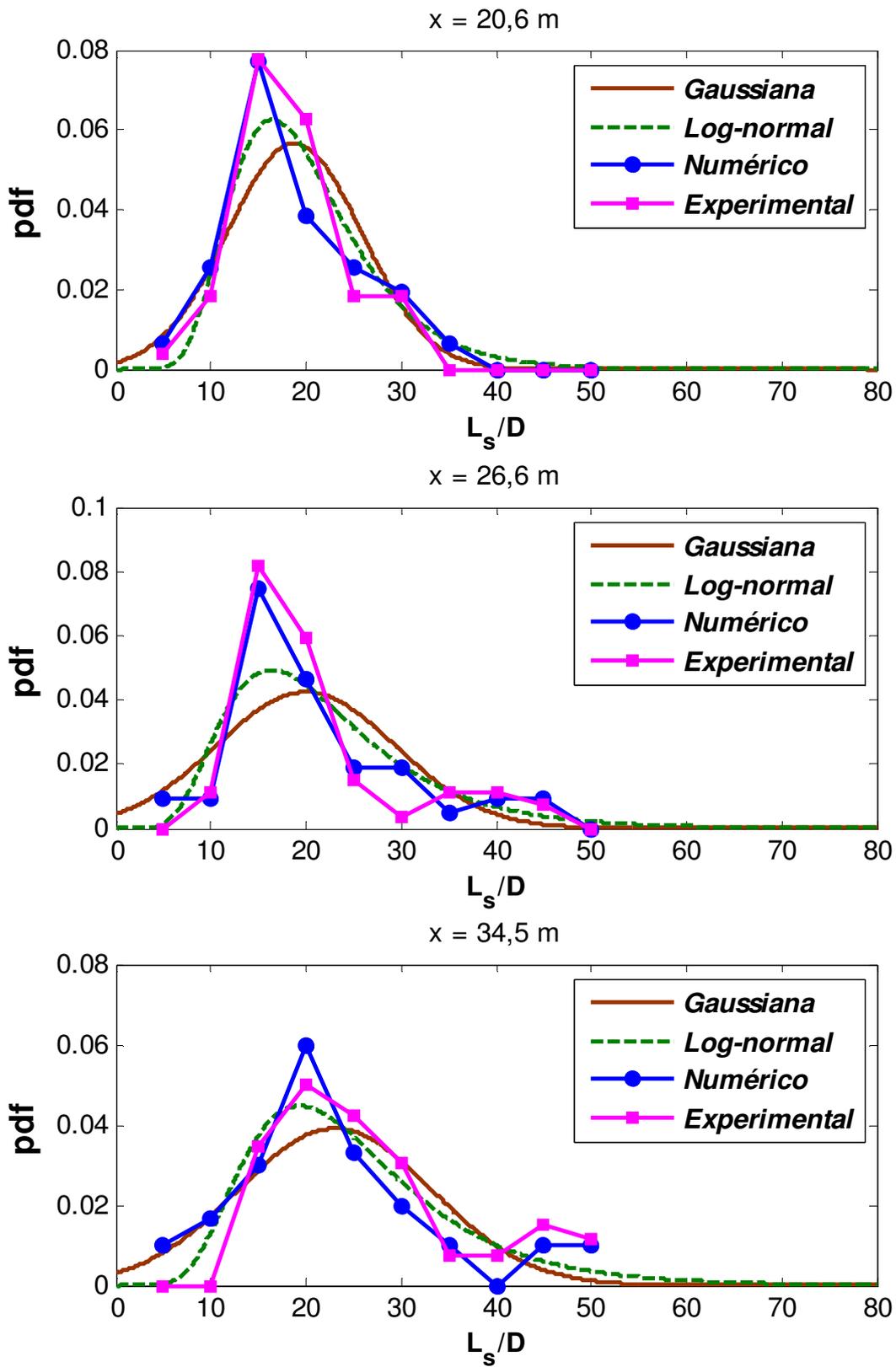


Fig.5.9 - Evolução do Comprimento da Golfada Ajustado por Funções de Densidade de Probabilidade (PDF). Caso 1:  $U_{sL} = 0,41 \text{ m/s}$ ,  $U_{sG} = 2,36 \text{ m/s}$ .

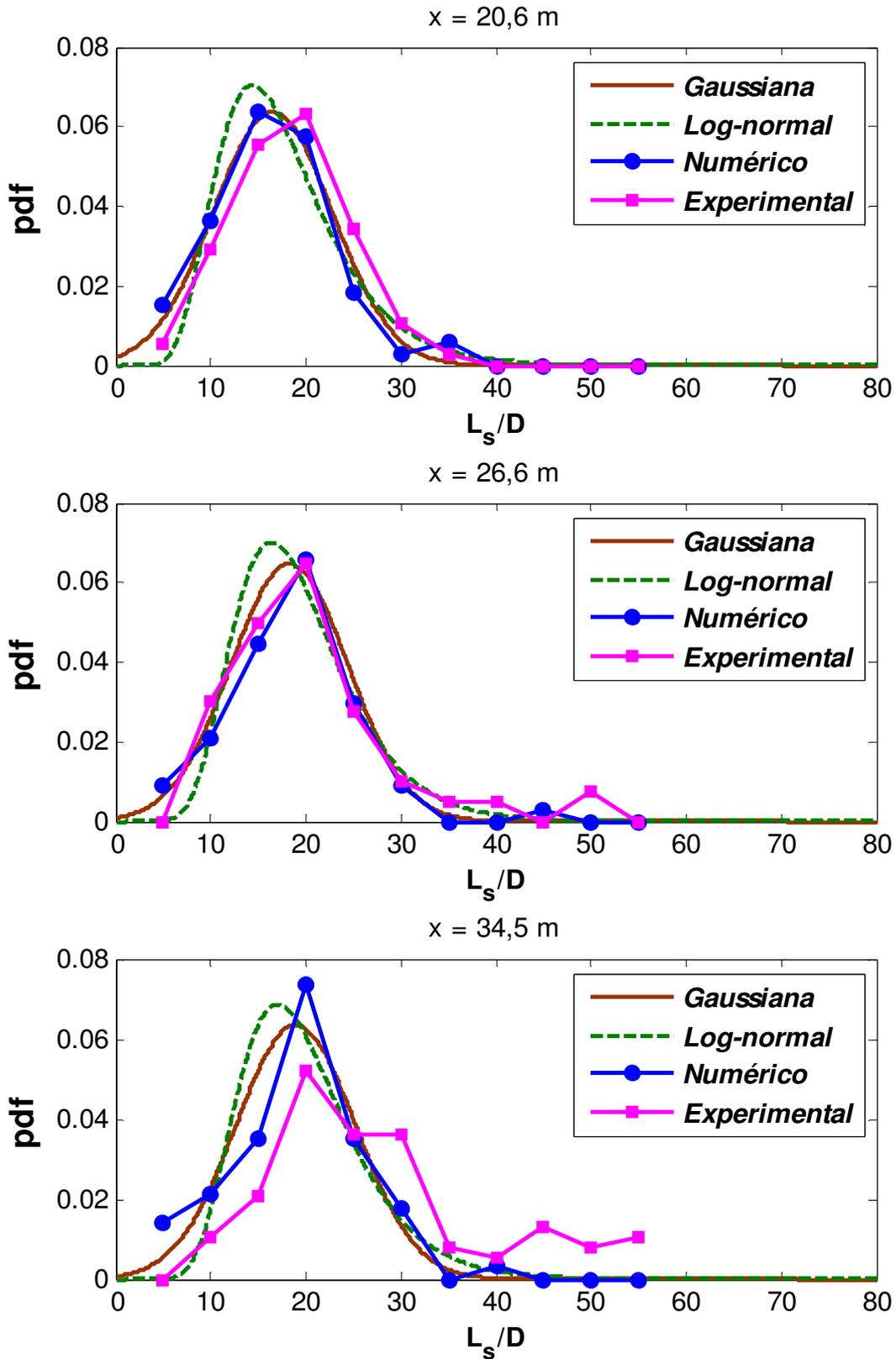


Fig.5.10 - Evolução do Comprimento da Golfada Ajustado por Funções de Densidade de Probabilidade (PDF). Caso 2:  $U_{sL} = 0,61 \text{ m/s}$ ,  $U_{sG} = 2,55 \text{ m/s}$ .

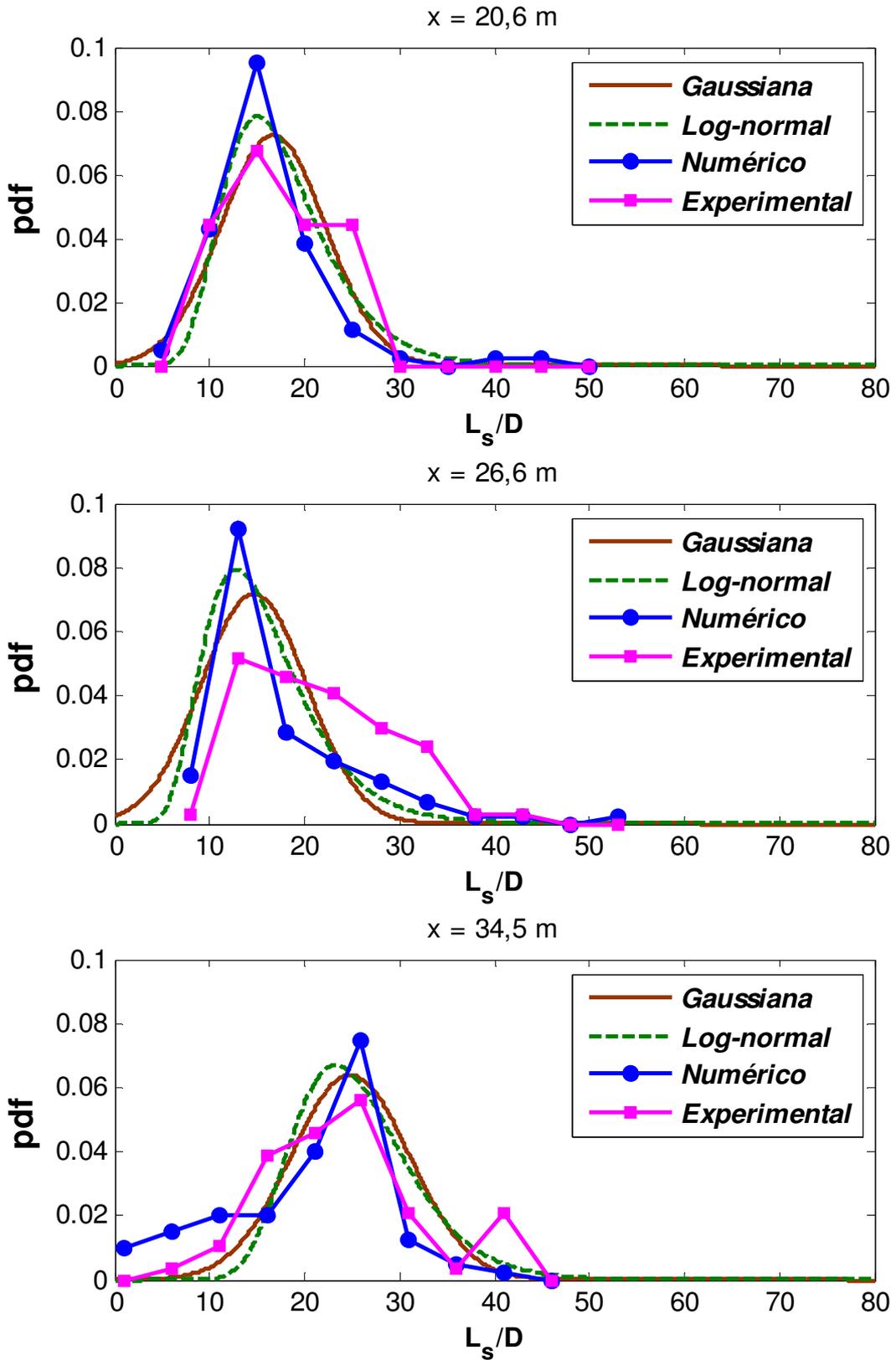


Fig.5.11 - Evolução do Comprimento da Golfada Ajustado por Funções de Densidade de Probabilidade (PDF). Caso 3:  $U_{sL} = 0,61 \text{ m/s}$ ,  $U_{sG} = 4,64 \text{ m/s}$

Tabela 5.4 Determinação do Erro Padrão. Configuração 1

Posição (m)	Erro-padrão					
	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	<i>Normal</i>	<i>Log-normal</i>	<i>Normal</i>	<i>Log-normal</i>	<i>Normal</i>	<i>Log-normal</i>
20,6	1,27	0,89	0,38	0,76	1,33	0,97
26,6	1,64	1,28	0,53	0,84	2,31	2,01
34,5	1,10	0,90	0,83	1,23	1,75	2,07
Erro médio	1,34	1,02	0,58	0,94	1,80	1,68

Vale a pena observar que apesar da distribuição normal representar melhor o Caso 2, os erros obtidos com a distribuição *log-normal* são da mesma ordem de grandeza que os erros obtidos para os outros casos, o que leva a sugerir, que esta distribuição poderia ser sempre utilizada para representar a distribuição dos comprimentos das golfadas ao longo da tubulação. Ujang et al. (2006) e Wang et al. (2006) também recomendam a utilização da distribuição *log-normal* para representar a distribuição de comprimentos.

### 5.1.2 Velocidade de Translação das Golfadas

Nicklin et al. (1962) propôs a seguinte correlação para avaliar a velocidade de translação da bolha alongada (ou cauda da golfada,  $U_b$ ), mas é usada aqui para comparar também a velocidade de translação da frente da golfada,  $U_f$ :

$$U_f = C_o U_M + U_d \quad (5.1)$$

onde  $U_d$  é a velocidade de deslizamento e  $U_M$  é a velocidade de mistura. Bendiksen (1984), utilizando uma base dados experimentais para diversas vazões, estimou o valor de  $C_o$  e a velocidade de deslizamento  $U_d$  em função do número de Froude,  $Fr_M = U_M / (g D)^{0,5}$ , sendo o número de Froude crítico  $Fr_{crit} = 3,5$ .

$$\begin{aligned} Fr_M > Fr_{crit} &\Rightarrow C_o = 1,20, \quad U_d = 0 \\ Fr_M \leq Fr_{crit} &\Rightarrow C_o = 1,05, \quad U_d = 0,54\sqrt{gD} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Para todos os casos analisados, o número de Froude é maior do que 3,5. A Tabela 5.5 apresenta os valores de  $C_o$  e  $U_d$  para cada caso.

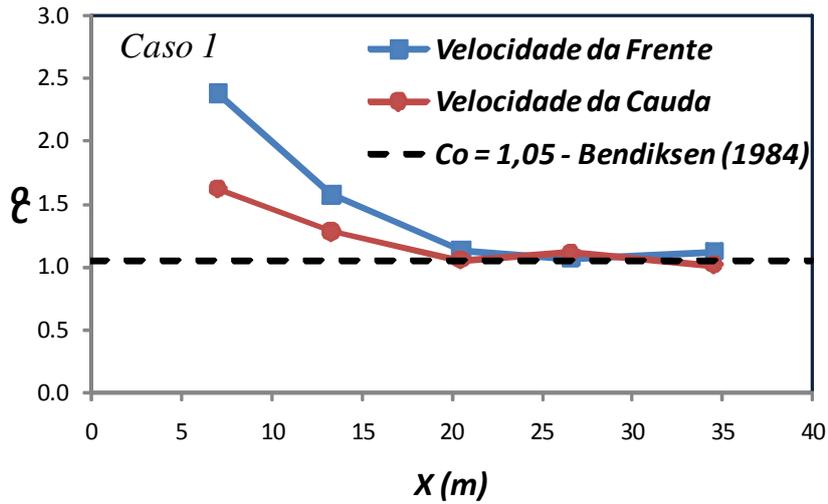
Para avaliar a velocidade de translação das golfadas, pode-se determinar numericamente o valor de  $C_o$  a partir da Eq. 5.2, em função da velocidade de translação determinada numericamente.

Tabela 5.5 – Valores dos Parâmetros  $C_o$  e  $U_d$

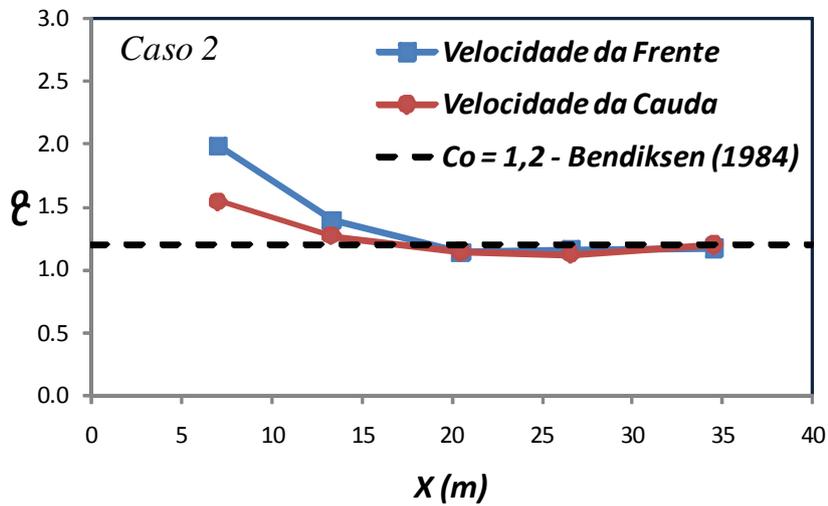
Casos	$U_{sG}$ (m/s)	$U_{sL}$ (m/s)	$U_M$ (m/s)	$F_{rM}$	$C_o$	$U_d$
1	2,36	0,41	2,77	3,167	1,05	0,47
2	2,55	0,61	3,16	3,612	1,20	0,00
3	4,64	0,61	5,25	6,002	1,20	0,00

A Figura 5.12 apresenta a evolução da velocidade média da frente e cauda da golfada (através do coeficiente  $C_o$ ) ao longo da tubulação. Observa-se que na entrada da tubulação a velocidade da frente da golfada é maior que da cauda. Assim que se forma, a golfada começa a crescer de comprimento, com sua frente se deslocando mais rapidamente que sua cauda. Isto pode ser observado, analisando a Fig. 5.12 juntamente com a Fig. 5.8. É possível que a golfada continue a crescer ao longo da tubulação, se a camada de líquido na sua frente for alta suficiente para manter o crescimento da frente. A grande espessura do líquido na frente da golfada, leva a um rápido crescimento a golfada. Observa-se, que as duas velocidades da frente e cauda diminuem até atingir a um valor aproximadamente constante (para  $L_s/D \sim 20$ ), coincidindo com o valor da correlação de Bendiksen (1984). Em geral, para longas tubulações, as golfadas se desenvolvem tendendo a um comprimento aproximadamente constante. No presente caso, a tubulação é relativamente curta. Observa-se que nos Caso 1 e 3, a velocidade da frente difere da velocidade da cauda, causando um aumento no comprimento da golfada, o qual é observado numericamente e experimentalmente. Já no Caso 2, como as velocidades são praticamente iguais, o comprimento da golfada se estabiliza.

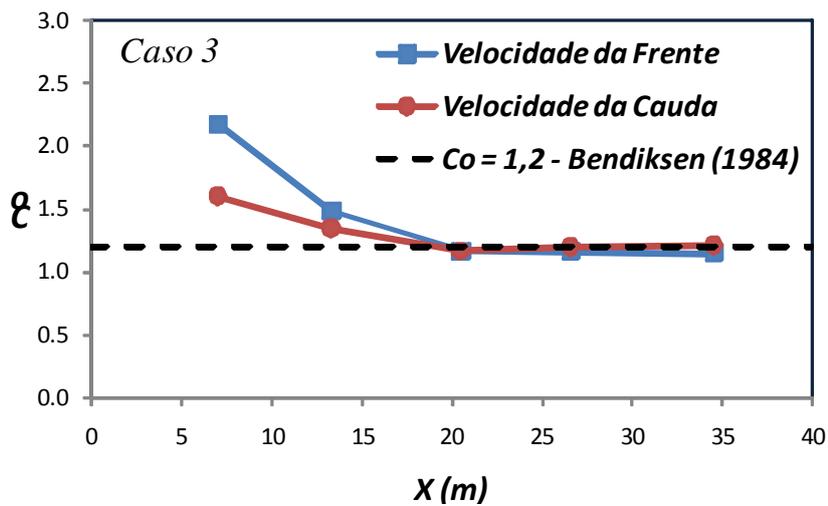
Para os três casos, a metodologia apresentada foi capaz de reproduzir o mesmo comportamento observado experimentalmente por Ujang et al. (2006), tanto para o comprimento da golfada quanto para a sua velocidade de deslocamento.



(a) Caso 1:  $U_{sL} = 0,41$  m/s e  $U_{sG} = 2,36$  m/s



(b) Caso 2:  $U_{sL} = 0,61$  m/s e  $U_{sG} = 2,55$  m/s

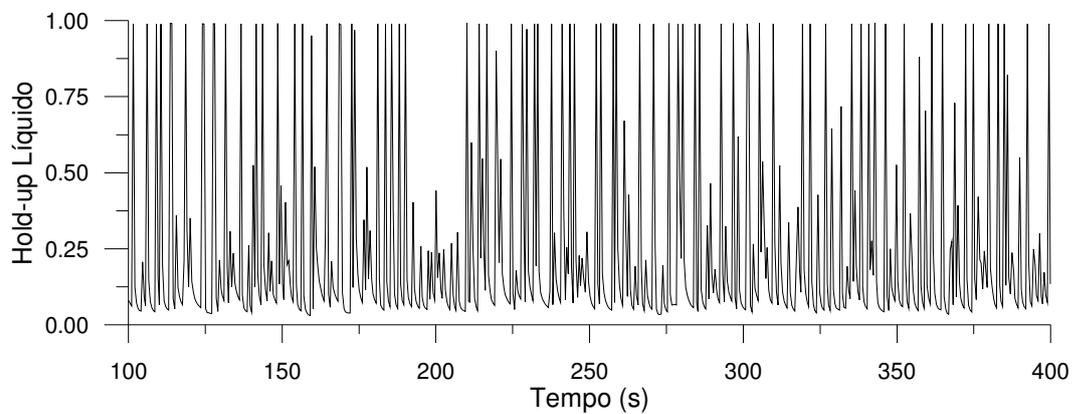


(c) Caso 3:  $U_{sL} = 0,61$  m/s e  $U_{sG} = 4,64$  m/s

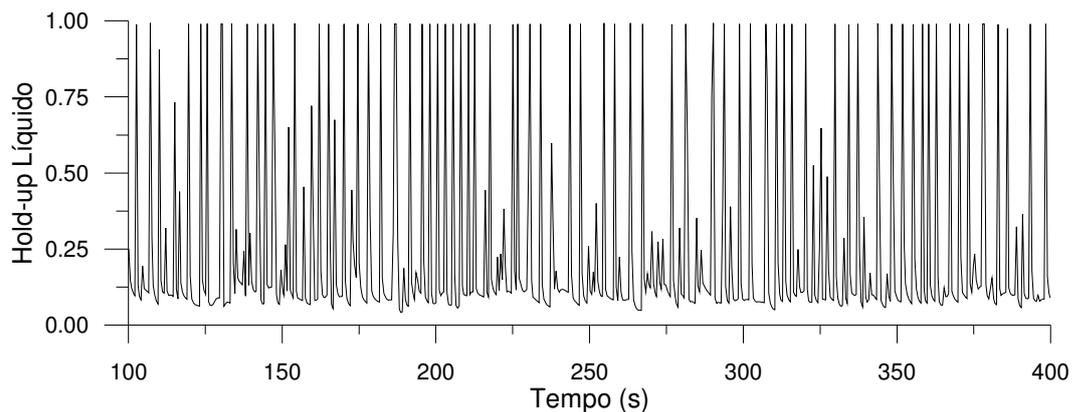
Figura 5.12 – Evolução da Velocidade Média da Frente e Cauda e o Comprimento das Golfadas ao Longo da Tubulação.

### 5.1.3 Frequência das Golfadas

Para o cálculo das frequências de passagem das golfadas foi determinado numericamente a distribuição temporal do *hold-up* do líquido em duas posições fixas na tubulação. A primeira próxima à região onde formam as primeiras golfadas ( $x = 13$  m) e a segunda próxima à saída da tubulação ( $x = 35$  m). A Figura 5.13 ilustra esta distribuição para o Caso 2, onde claramente observa-se o caráter estocástico das golfadas. A distribuição de frequências para o mesmo caso, nas mesmas posições é apresentada na Figura. 5.14. Nota-se um comportamento bem semelhante em ambas as posições, com a frequência média entre  $0,2$  e  $0,4$   $s^{-1}$ .



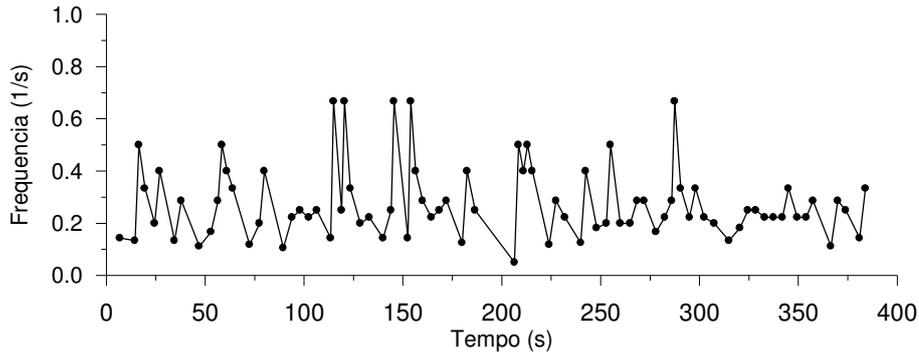
(a)  $x = 13$  m.



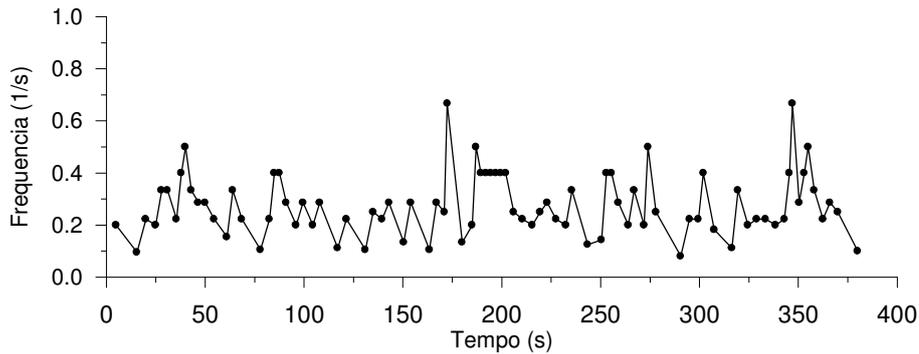
(b)  $x = 35$  m.

Figura 5.13 – Variação do *hold-up* do Líquido com o Tempo para Duas Posições

Caso 2:  $U_{SL} = 0,61$  m/s,  $U_{SG} = 2,55$  m/s



(a)  $x = 13$  m.



(b)  $x = 35$  m.

Figura 5.14 – Distribuição da Freqüência com o Tempo para Duas Posições.

Caso 2:  $U_{SL} = 0,61$  m/s,  $U_{sG} = 2,55$  m/s.

Na Figura 5.15 apresenta-se uma comparação com os dados experimentais da frequência média no domínio em função da velocidade de mistura  $U_M$  e em função da velocidade superficial do líquido  $U_{SL}$  para os três casos analisados. Observa-se uma boa concordância, com erros variando de 7 a 25%. Observa-se que a frequência média é correlacionada com a velocidade superficial do líquido, com pequena variação com relação à velocidade superficial do gás.

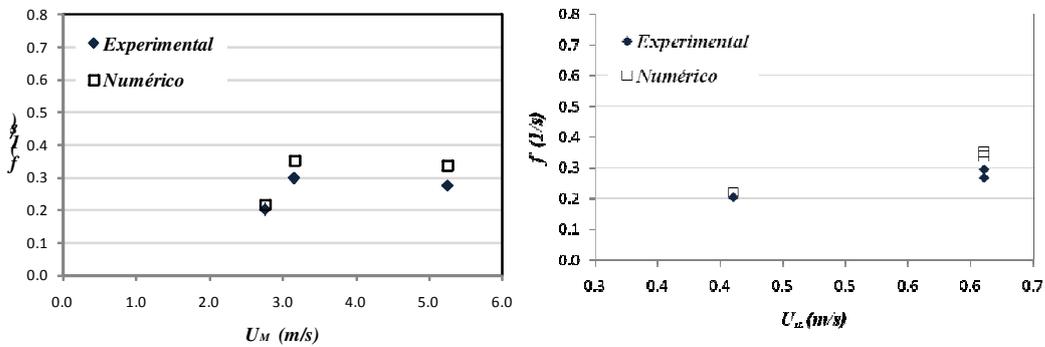


Figura 5.15 – Distribuição da Freqüência Média no Domínio para Casos 1, 2 e 3, em função da velocidade de mistura e da velocidade superficial do líquido.

### 5.1.4 Distribuição de Pressão

A Figura 5.16 ilustra o perfil de pressão instantânea ( $t = 230$  s) ao longo do duto para o Caso 2. Pode-se observar que a queda de pressão é muito maior na região da golfada líquida do que na região que possui mais gás. Observa-se que queda brusca de pressão na região da golfada líquida induz uma perturbação no campo de pressão instantânea.

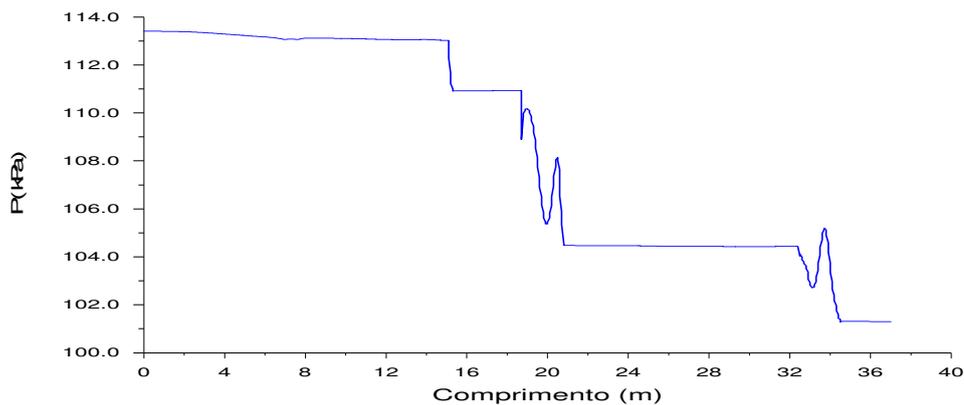


Figura 5.16 – Perfil instantâneo de Pressão ao Longo do Duto. Caso 2.

A variação coeficiente de pressão  $C_p$ , ao longo do duto, referente aos três casos desta configuração, encontra-se ilustrado na Fig. 5.17. O coeficiente de pressão  $C_p$  é corresponde à pressão média no tempo adimensional, sendo definido por

$$C_p = \frac{(\bar{p} - p_{out})}{0,5 \rho_m U_M^2} \quad (5.3)$$

Analisando a Fig. 5.17 observa-se uma região de desenvolvimento de escoamento próximo à entrada. A queda de pressão adimensional para os casos 2 e 3 é praticamente coincidente, pois os dois casos possuem a mesma velocidade superficial do líquido e a queda de pressão associada com o líquido é muito maior que a queda de pressão do gás, como mostrado na Figura 5.17.

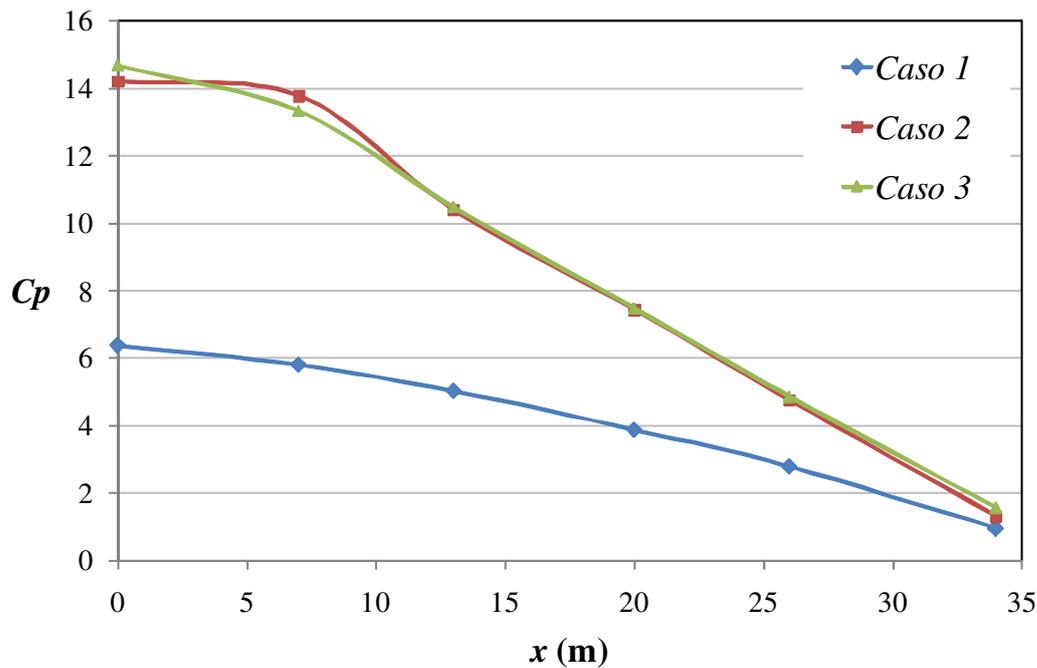


Figura 5.17 – Coeficiente de Pressão ao Longo do Duto. Casos 1, 2 e 3.

A queda de pressão obtida numericamente pode ser comparada com correlações empíricas disponíveis na literatura. Uma delas é a correlação de Lockhart-Martinelli que utiliza os resultados do gradiente de pressão do escoamento unifásico de cada um dos fluidos. A correlação admite que as densidades dos fluidos permanecem constantes, e o componente do gradiente de pressão devido à gravidade não é considerado, ou seja, o modelo é aplicável a duto horizontal. Na Tabela 5.6 apresentam-se as correlações para cada fluido.

Tabela 5.6 – Correlações de Lockhart-Martinelli.

$Re_L = \rho_L U_{SL} D_h / \mu_L$	$Re_G = \rho_G U_{SG} D_h / \mu_G$
$f_L = c_L Re_L^{-n_L}$	$f_G = c_G Re_G^{-n_G}$
$(dp/dx)_L = \left( \frac{1}{2} \frac{f_L}{D_h} \rho_L U_{SL}^2 \right)$	$(dp/dx)_G = \left( \frac{1}{2} \frac{f_G}{D_h} \rho_G U_{SG}^2 \right)$
$X^2 = \frac{(dp/dx)_L}{(dp/dx)_G}$	
$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}$	$\Phi_G^2 = 1 + CX + X^2$
$(dp/dx) = \Phi_L^2 \times  (dp/dx)_L $	$(dp/dx) = \Phi_G^2 \times  (dp/dx)_G $

Os expoentes da correlação Lockhart-Martinelli dependem do regime de escoamento. Para Reynolds inferior a 1900 tem-se um regime laminar e acima um regime turbulento. Na tabela 5.7 mostra se os parâmetros de Lockhart-Martinelli.

Tabela 5.7 – Parâmetros de Lockhart-Martinelli.

Regime		$c_K$	$n_K$	$C$
Líquido	Gás			
Laminar	Laminar	16	1,0	5
Laminar	Turbulento	16	0,2	12
Turbulento	Laminar	0,316	1,0	10
Turbulento	Turbulento	0,316	0,2	20

Na Tabela 5.8 apresenta-se a comparação dos resultados da queda de pressão calculados pela correlação de Lockhart-Martinelli e obtidos numericamente. Para o Caso1, a comparação não foi muito boa, mas para os outros dois casos, a estimativa da correlação apresentou resultados compatíveis com a previsão obtida com a presente metodologia.

Tabela 5.8 – Queda de Pressão Média. Configuração 1

Caso	L-M (Pa/m)	Numérico (Pa/m)	Erro (%)
1	233,91	110,43	52,79%
2	379,65	419,07	10,38%
3	591,25	683,37	15,65%

#### 5.1.4 Distribuição de Velocidades

Um resultado interessante de ser analisado consiste no perfil axial da velocidade instantânea do gás e do líquido ( $t = 230$  s). A Figura 5.18 apresenta um resultado típico correspondente ao Caso 2. Para facilitar a interpretação do resultado, um perfil de fração volumétrica do gás também é acrescentado na figura.

Observa-se claramente que as duas velocidades são correlacionadas entre si e com a fração volumétrica do líquido. Ocorre uma queda significativa da velocidade do gás durante a formação da golfada, já a velocidade do líquido acompanha a variação da fração volumétrica. Quando a golfada se forma e todo

líquido ocupa a seção transversal, a velocidade do líquido é constante. Nesta região como não existe gás, o valor da velocidade do gás é arbitrário.

A Figura 5.18 apresenta uns picos irrealistas de velocidade do gás quando ocorre a formação da golfada. Este fato ocorre devido ao fato da equação de quantidade de movimento do gás se tornar singular quando  $\alpha_G = 0$ , necessitando de um ajuste arbitrário para evitar este efeito. Este comportamento também foi observado e comentado por Issa e Kempf (2003).

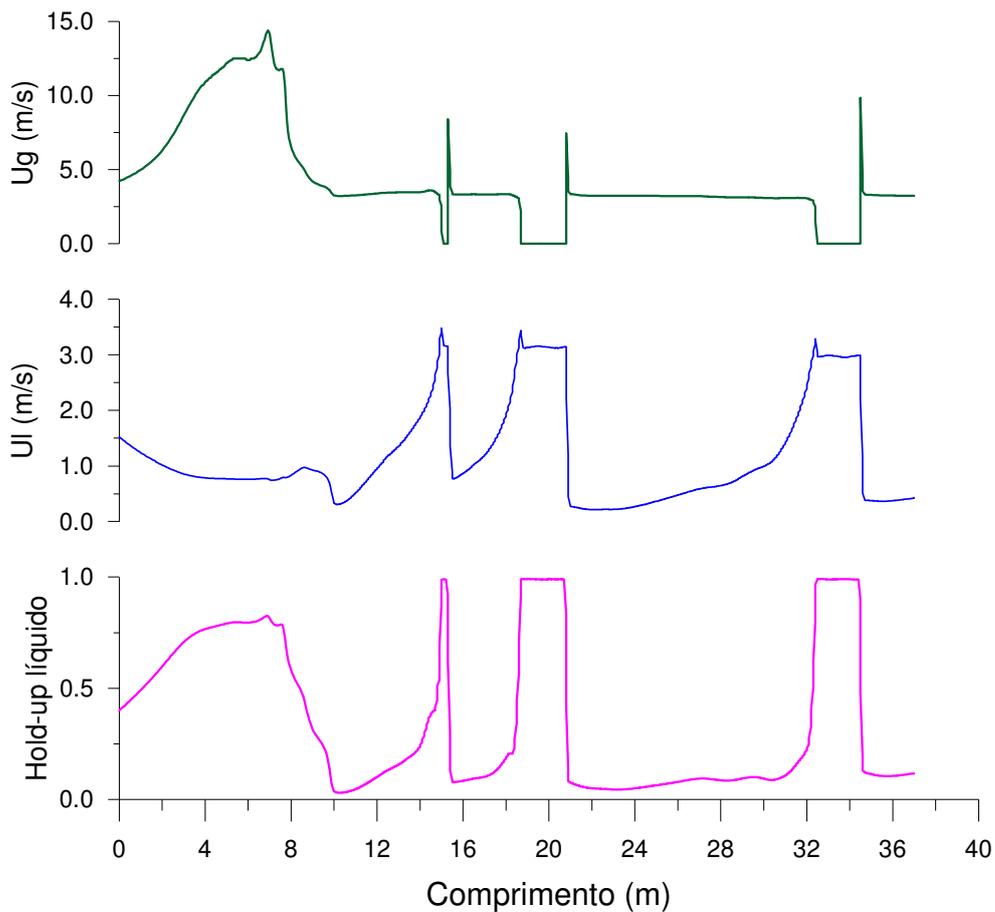


Figura 5.18 – Perfil Instantâneo de Velocidade do Gás e do Líquido ao Longo do Canal..

Caso 2:  $U_{SL} = 0,61$  m/s,  $U_{SG} = 2,55$  m/s.

## 5.2 Configuração 2

A segunda configuração analisada neste trabalho é baseada na configuração experimental de Fonseca (2009), a qual consiste de um duto horizontal de  $L = 10$  m de comprimento, com diâmetro  $D = 0,024$  m.

Para todos os testes realizados especificou como condição de contorno na entrada, o valor de fração volumétrica de gás  $\alpha_G$  a partir das velocidades superficiais de cada fase

$$\alpha_G = \frac{U_{sG}}{U_M} \quad ; \quad U_M = U_{sL} + U_{sG} \quad (5.4)$$

Seis casos foram testados e as velocidades superficiais e de mistura, assim como a fração volumétrica de gás na entrada de cada caso encontram-se na Tabela 5.9. A pressão na saída da tubulação foi mantida constante e igual à pressão atmosférica.

Tabela 5.9- Condições Experimentais de Operação

Casos	$U_{sG}$ (m/s)	$U_{sL}$ (m/s)	$U_M$ (m/s)	$\alpha_G = U_{sG}/U_M$	$Fr_M$
1	0,475	0,295	0,770	0,62	1,587
2	0,475	0,393	0,868	0,55	1,789
3	0,475	0,516	0,991	0,48	2,042
4	0,788	0,295	1,083	0,73	2,232
5	0,788	0,393	1,181	0,67	2,434
6	0,788	0,516	1,304	0,60	2,687

A Figura 5.19 apresenta o mapa de padrões de escoamento correspondente à configuração selecionada. A curva que separa as regiões onde as equações são bem ou mal postas também foi incluída no mapa. Os seis casos testados foram divididos em dois grupos. Os casos do Grupo 1 possuem a menor velocidade superficial de gás, e são representados pelo símbolo  $\diamond$ . Os casos do Grupo 2 são representados no mapa com o símbolo  $\circ$ . Pode-se observar que todos os casos encontram-se na região do padrão em golfadas, como desejado. Ainda analisando a Figura 5.19 observa-se que todos os casos encontram-se no limite de bem posto, sendo que os caso 3 e 6 coincidem com a curva limítrofe.

Febres (2009) também analisou estes mesmos casos utilizando uma formulação tri-dimensional, juntamente com o modelo VOF para determinar o campo de velocidade e pressão de uma única célula de golfada líquida e bolha de Taylor. A forma da bolha assim com o perfil de velocidade no filme líquido e na golfada foi comparada com os dados experimentais de Fonseca (2009) apresentando boa concordância. Devido as baixas velocidades superficiais de gás empregadas nos testes desta configuração, Febres (2009) acrescentou mais uma

curva no mapa de transição, para identificar o padrão de golfadas formadas por bolhas alongadas. De acordo com Febres, os casos do Grupo 1 correspondem à bolhas alongadas e os casos do Grupo 2, correspondem à transição entre golfadas e bolhas alongadas.

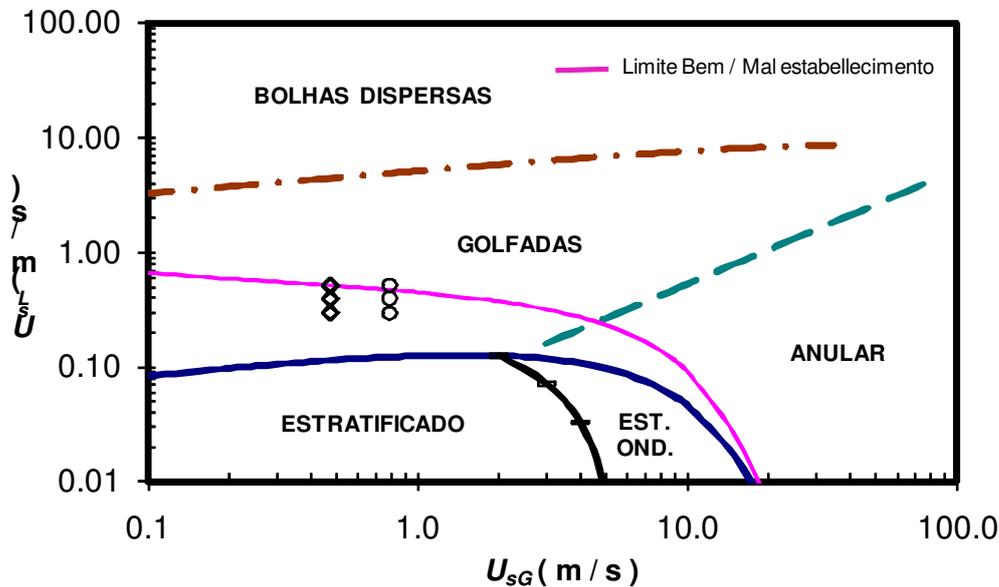
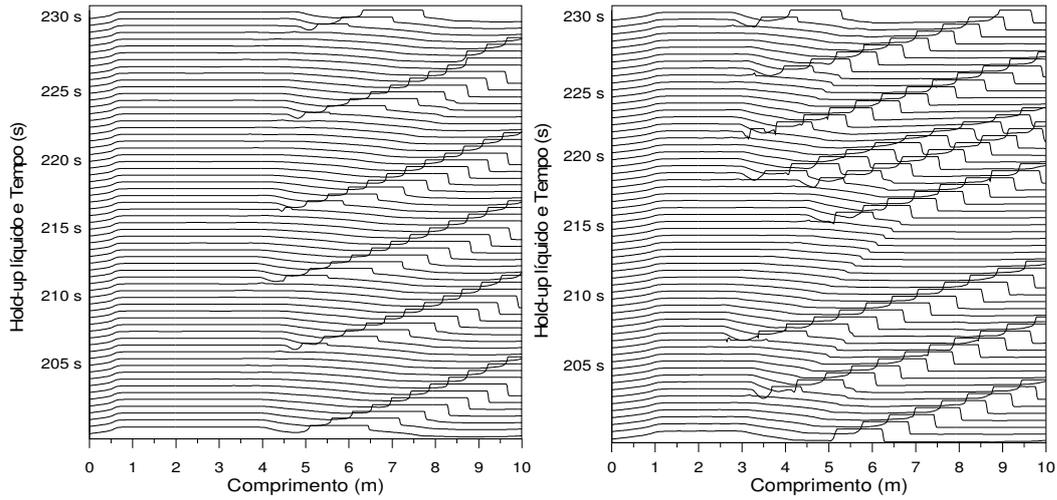


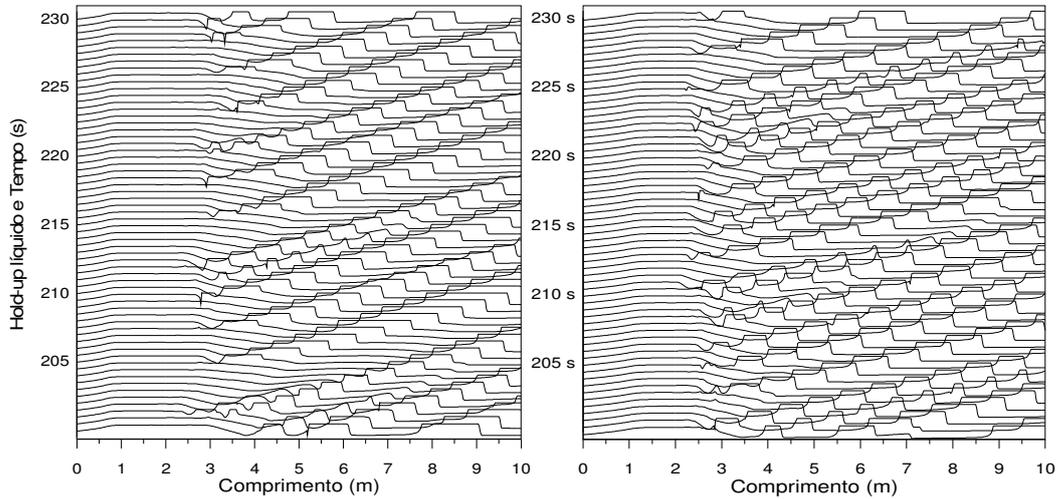
Figura 5.19 – Mapa de Padrões de Escoamento da Configuração 2.

A evolução do *hold-up* líquido ao longo da tubulação para diferentes instantes de tempo é apresentada para todos os casos testados nas Figs. 5.20 a 5.22. Em cada figura, a velocidade superficial do líquido foi mantida constante e as duas velocidades superficiais do gás testadas foram apresentadas. Somente os resultados após atingir o regime estatisticamente permanente são apresentados (tempos superiores a 200 s). Analisando as figuras, observa-se que a metodologia foi capaz de reproduzir o caráter intermitente do escoamento no padrão de golfadas, com uma variedade de comprimentos das golfadas, concordando com a literatura (Dukler e Hubbard, 1975; Fabre e Liné, 1992; Barnea e Taitel, 1993). Nota-se claramente que para baixas velocidades superficiais do líquido, as golfadas são mais espaçadas. Para o Caso 1, observa-se a ocorrência de somente uma golfada na tubulação por instante de tempo, com um comprimento relativamente grande. A frequência das golfadas ainda é baixa para o Caso 4, porém maior que no Caso 1. Nota-se que com o aumento da velocidade superficial do gás, há uma diminuição no comprimento das golfadas. Observa-se ainda, que a medida que a velocidade superficial do líquido cresce, a frequência das golfadas também cresce, juntamente com uma diminuição do comprimento das mesmas.



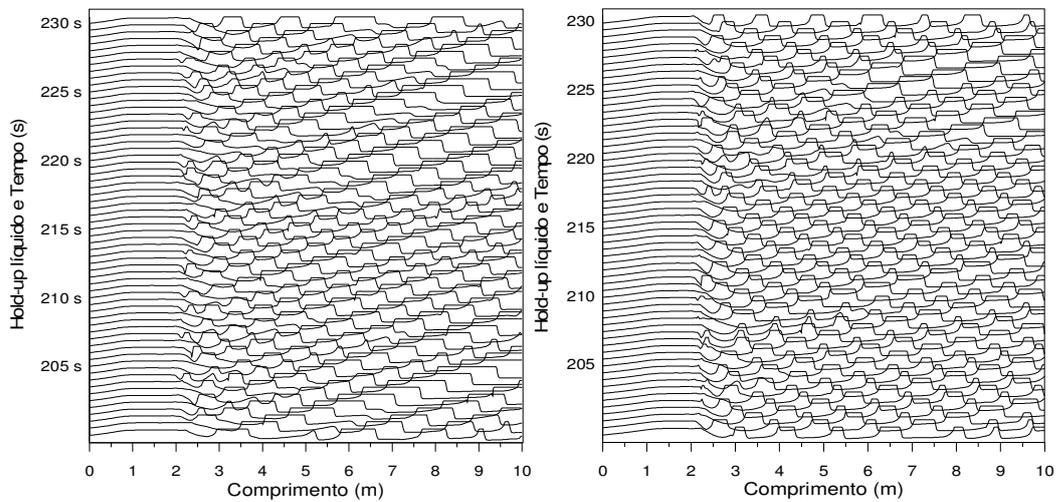
(a) Caso 1:  $U_{sL} = 0,295$  m/s,  $U_{sG} = 0,475$  m/s (b) Caso 4:  $U_{sL} = 0,295$  m/s,  $U_{sG} = 0,788$  m/s

Figura 5.20 – Evolução Espacial e Temporal do *holdup*. Configuração 2.



(a) Caso 2:  $U_{sL} = 0,393$  m/s,  $U_{sG} = 0,475$  m/s (b) Caso 5:  $U_{sL} = 0,393$  m/s,  $U_{sG} = 0,788$  m/s

Figura 5.21 – Evolução Espacial e Temporal do *Holdup*. Configuração 2.



(a) Caso 3:  $U_{sL} = 0,516$  m/s,  $U_{sG} = 0,475$  m/s (b) Caso 6:  $U_{sL} = 0,516$  m/s,  $U_{sG} = 0,788$  m/s

Figura 5.22 – Evolução Espacial e Temporal do *Holdup*. Configuração 2.

Nas próximas seções, os resultados das simulações são comparados com os dados medidos por Fonseca (2009) para um ponto fixo da tubulação ( $x=9$  m).

### 5.2.1 Velocidade de Translação da Golfada

A velocidade média de translação da frente e cauda da golfada obtida numericamente é comparada com os dados experimentais e apresentada na Tabela 5.10. Pode se observar que os valores obtidos numericamente para a frente da golfada apresentam uma excelente concordância os dados experimentais (erros menores que 1%), com exceção do Caso 1, que apresenta um erro um pouco maior (6,8%). A concordância com os dados experimentais para a cauda da golfada ainda são satisfatórios, mas não são tão bons, com erro médio da ordem de 20%. Analisando os resultados nota-se que a velocidade média da frente e cauda da golfada aumentam com um aumento da velocidade de mistura. Observa-se também que os casos com a maior velocidade superficial do gás (Casos 4, 5 e 6) apresentam os menores erros para a velocidade da frente da golfada. Nenhuma tendência foi observada com relação o comportamento predito para a velocidade da cauda em relação aos dados experimentais.

Tabela 5.10 – Velocidade Média da Frente e Cauda da Golfada Líquida

Casos	Velocidade frente $U_f$ (m/s)			Velocidade cauda $U_b$ (m/s)		
	Exp.	Num.	Erro (%)	Exp.	Num.	Erro (%)
1	0,98	0,913	6,83	1,27	1,03	19,1
2	1,06	1,048	1,11	1,44	1,04	27,6
3	1,20	1,205	0,45	1,54	1,27	17,6
4	1,32	1,333	0,99	1,58	1,25	20,7
5	1,35	1,347	0,20	1,76	1,37	21,9
6	1,52	1,518	0,10	1,95	1,53	21,3

Fonseca (2009) fez uma comparação entre as velocidades da frente e cauda das golfadas, esta comparação é apresentada na Tabela 5.11 onde  $U_b/U_f$  é a razão entre as velocidades da cauda e frente da golfada, para os seis casos avaliados. De acordo com Fonseca (2009) a velocidade da bolha (cauda da golfada) é cerca de

30% superior à velocidade do pistão (frente da golfada), indicando que a bolha encontra-se em expansão. De acordo com os resultados numéricos obtidos a velocidade da cauda e frente da golfada tendem a se estabilizar com valores aproximadamente iguais, como ilustrado na Tabela 5.10, indicando que o escoamento já se desenvolveu.

A Figura 5.23 apresenta a comparação entre os valores das velocidades de translação da frente e cauda das golfadas obtidos numericamente e a correlação de Bendiksen (1984), Eq. 5.2, para as diversas velocidades de mistura utilizadas. Pode-se afirmar que uma boa concordância foi obtida, uma vez que todos os pontos se situam numa faixa de 15 % em relação à correlação.

Tabela 5.11 – Relação entre a Velocidade Média da Cauda e Frente da Golfada

Casos	$U_b / U_t$	
	Experimental	Numérico
1	1,30	1,13
2	1,36	0,99
3	1,28	1,05
4	1,20	0,94
5	1,30	1,02
6	1,28	1,01

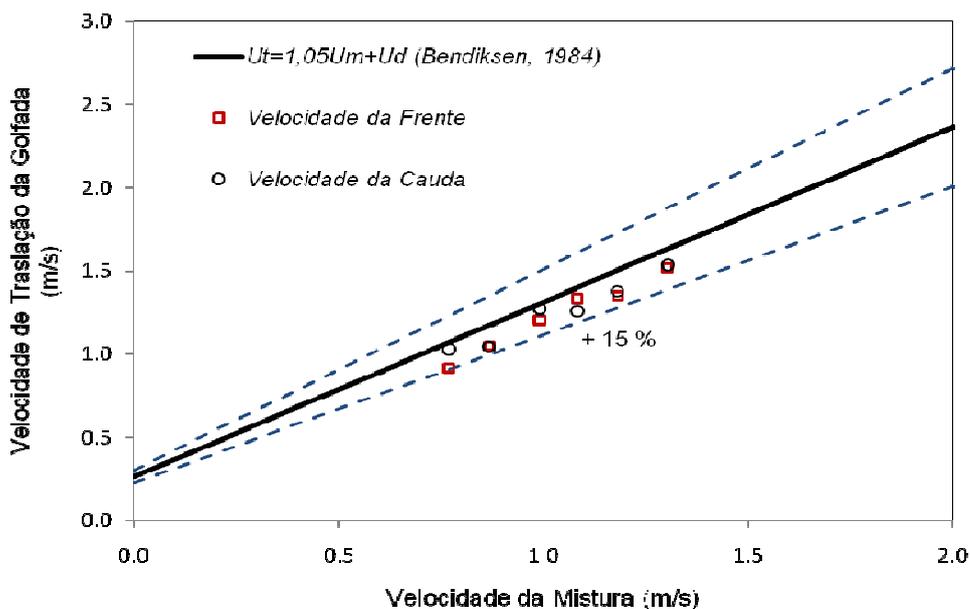
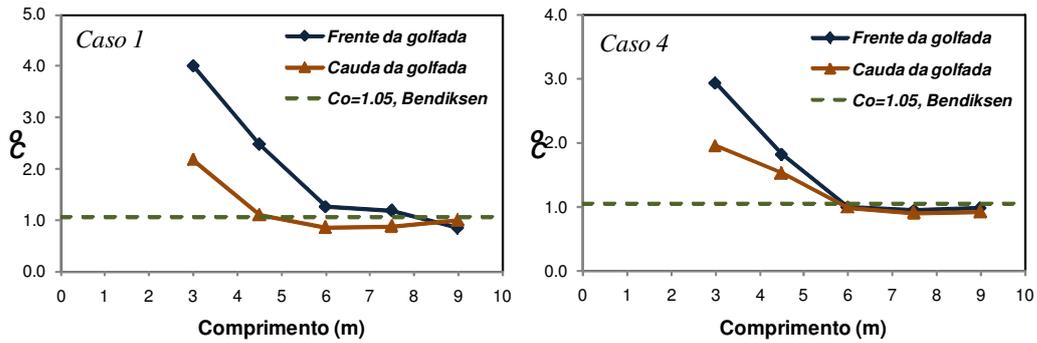
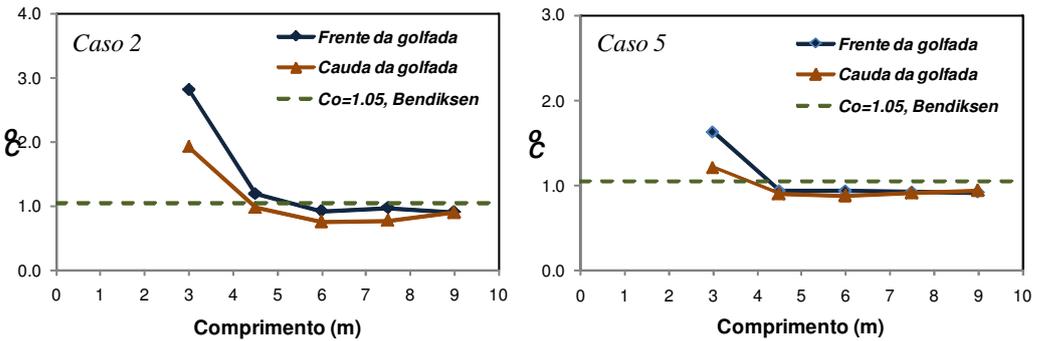


Figura 5.23 – Comparação da Velocidade de Translação da Frente e Cauda da Golfada com a Correlação de Bendiksen (1984).

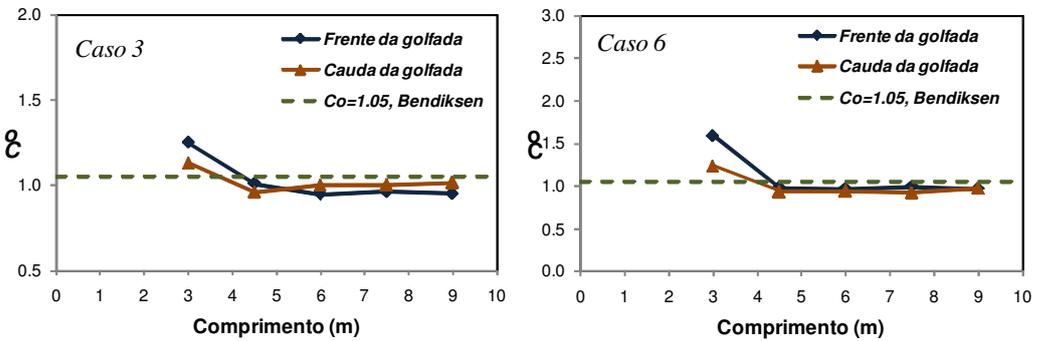
A evolução da velocidade da frente e da cauda das golfadas ao longo do duto é ilustrada na Fig. 5.24, para os seis casos. Observa-se o mesmo comportamento observado para a Configuração 1, i.e., a velocidade da frente da golfada é maior do que a velocidade da cauda, e a partir da coordenada aproximadamente igual a  $x = 6$  m as duas velocidades se igualam, apresentando uma boa concordância com a correlação de Bendiksen (1984).



(a) Caso 1:  $U_{sL} = 0,295$  m/s,  $U_{sG} = 0,475$  m/s (b) Caso 4:  $U_{sL} = 0,295$  m/s,  $U_{sG} = 0,788$  m/s



(c) Caso 2:  $U_{sL} = 0,393$  m/s,  $U_{sG} = 0,475$  m/s (d) Caso 5:  $U_{sL} = 0,393$  m/s,  $U_{sG} = 0,788$  m/s



(e) Caso 3:  $U_{sL} = 0,516$  m/s,  $U_{sG} = 0,475$  m/s (f) Caso 6:  $U_{sL} = 0,516$  m/s,  $U_{sG} = 0,788$  m/s

Figura 5.24 – Evolução da Velocidade Média da Frente e Cauda das Golfadas ao Longo da Tubulação.

Observa-se ainda que para baixas velocidades superficiais do líquido (Casos 1 e 4) ilustrados nas Fig. 5.24a e 5.24b, a diferença entre as velocidades no início de formação das golfadas é maior. Com o aumento da velocidade superficial do líquido esta diferença cai, como por ser notado nos Casos 2 e 5 ilustrados nas Figs. 5.24c e 5.24d, caindo mais ainda para os casos 3 e 6, correspondentes às maiores velocidades superficiais do líquido (Figs. 5.24e e 5.24f).

## 5.2.2

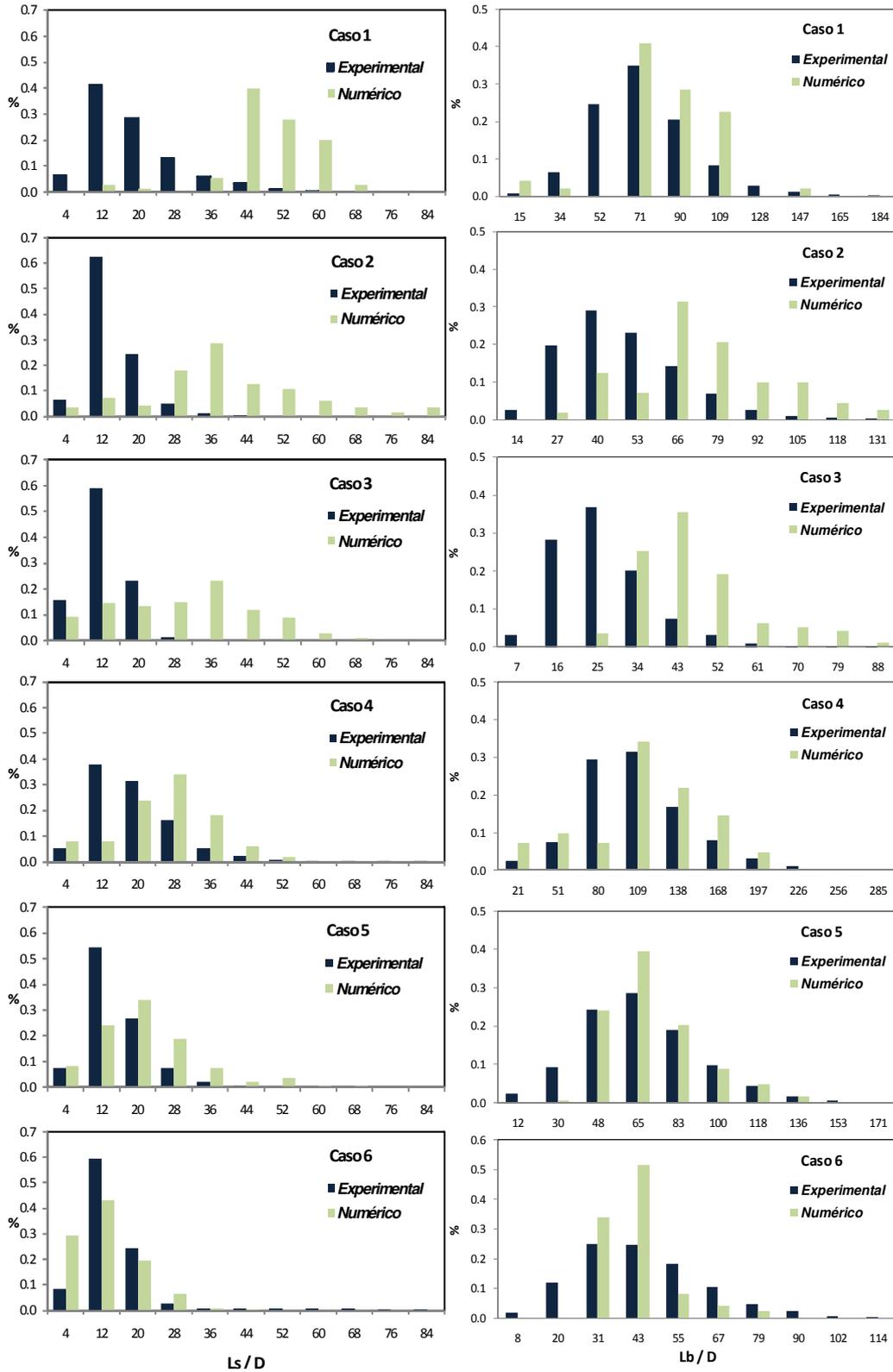
### Comprimento da Golfada Líquida e da Bolha de Taylor

Os valores medidos numericamente referentes ao comprimento médio da golfada líquida e da bolha de Taylor, na coordenada igual a  $x = 9$  m são comparados com os dados experimentais de Fonseca (2009) na Tabela 5.12. Já os histogramas com a distribuição de comprimentos da golfada líquida e da bolha de Taylor na mesma coordenada  $x = 9$  m são apresentados na Fig. 5.25, juntamente com os histogramas medidos por Fonseca (2009).

Tabela 5.12 – Comprimento da Golfada Líquida e Bolha de Taylor.

Casos	Golfada líquida $L_s/D$			Bolha de Taylor $L_b/D$		
	Exp.	Num.	Erro (%)	Exp.	Num.	Erro (%)
1	19,00	48,43	155	75,20	83,87	11,5
2	14,70	38,45	162	49,10	74,52	51,8
3	12,90	29,59	129	26,80	46,75	74,4
4	19,40	24,62	27	109,70	111,74	1,9
5	16,20	21,99	36	68,00	71,92	5,8
6	15,70	12,38	21	45,10	41,72	7,5

Apesar do excelente resultado para a velocidade de translação da golfada líquida, a concordância entre os comprimentos preditos não foi boa, especialmente para os casos do Grupo 1 (Casos 1, 2 e 3) correspondentes a baixa velocidade superficial do gás. A predição do tamanho da bolha de Taylor do Grupo 1 também não foi satisfatória, porém, para os casos do Grupo 2 (Casos 4, 5 e 6) foi excelente.



(a) Golfada Líquida

(b) Bolha

Figura 5.25 – Distribuição do Comprimento da Golfada Líquida e da Bolha na Coordenada  $x = 9$  m.

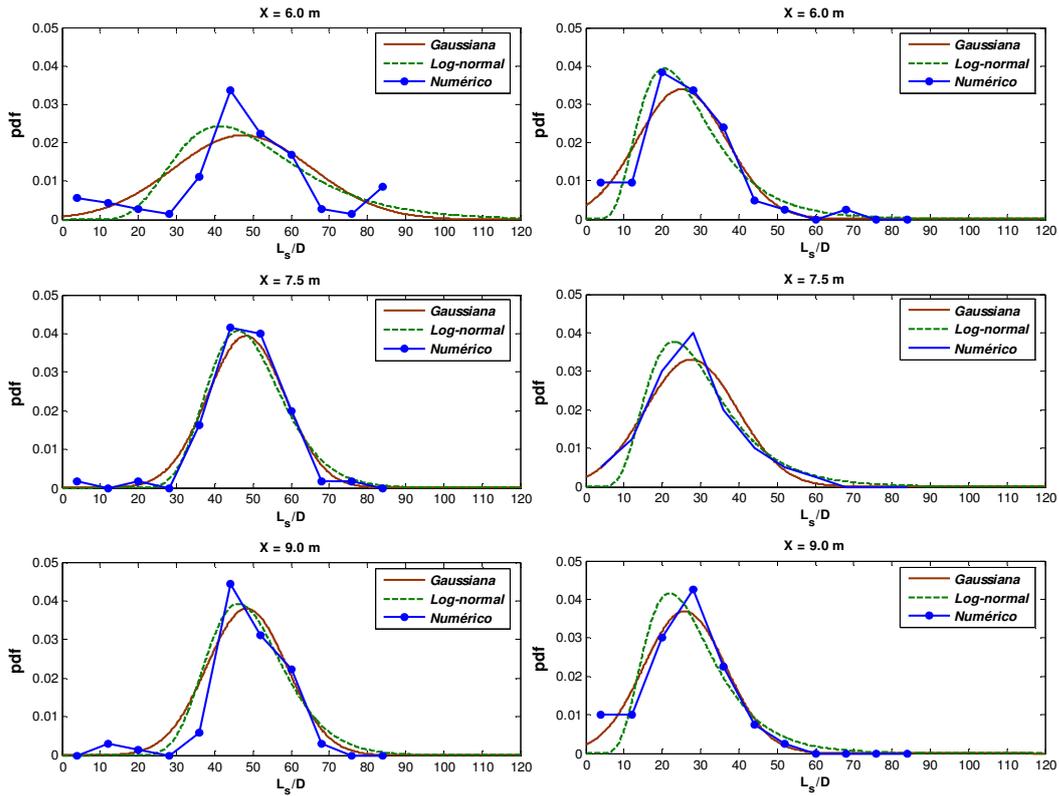
O interessante a ser notado com relação aos resultados obtidos é que de acordo com o mapa de padrão, os casos do Grupo 1 correspondem a bolhas alongadas, condizentes com os valores preditos numericamente. Uma possível explicação com relação a discrepância dos tamanhos pode estar relacionada com a proximidade do ponto de medição à saída da tubulação, pois, de acordo com Fonseca (2009), esta proximidade poderia estar induzindo um gradiente de pressão que acelerou a golfada, influenciando no comprimento da mesma. Como foi mostrado na seção anterior, a velocidade medida experimentalmente foi acima da prevista numericamente e da correlação de Bendiksen (1984), corroborando para a explicação acima.

Uma análise dos histogramas referentes à distribuição de comprimentos da golfada líquida e da bolha de Taylor na coordenada  $x = 9$  m na Fig. 5.25, mostra que não só o comprimento médio não corresponde aos dados experimentais para os casos do Grupo 1, como a distribuição dos mesmos também é totalmente diferente. Porém, para os casos do Grupo 2, com velocidade superficial do gás mais elevada, a distribuição dos comprimentos tanto da golfada líquida, como da bolha de Taylor são satisfatórios.

Os gráficos com a função de distribuição de probabilidade para os 6 casos da configuração 2 encontram-se nas Figs. 5.26 a 5.28. Observa-se que a distribuição normal fornece uma boa aproximação para a distribuição dos comprimentos da golfada em cada coordenada ao longo da tubulação, para os seis casos.

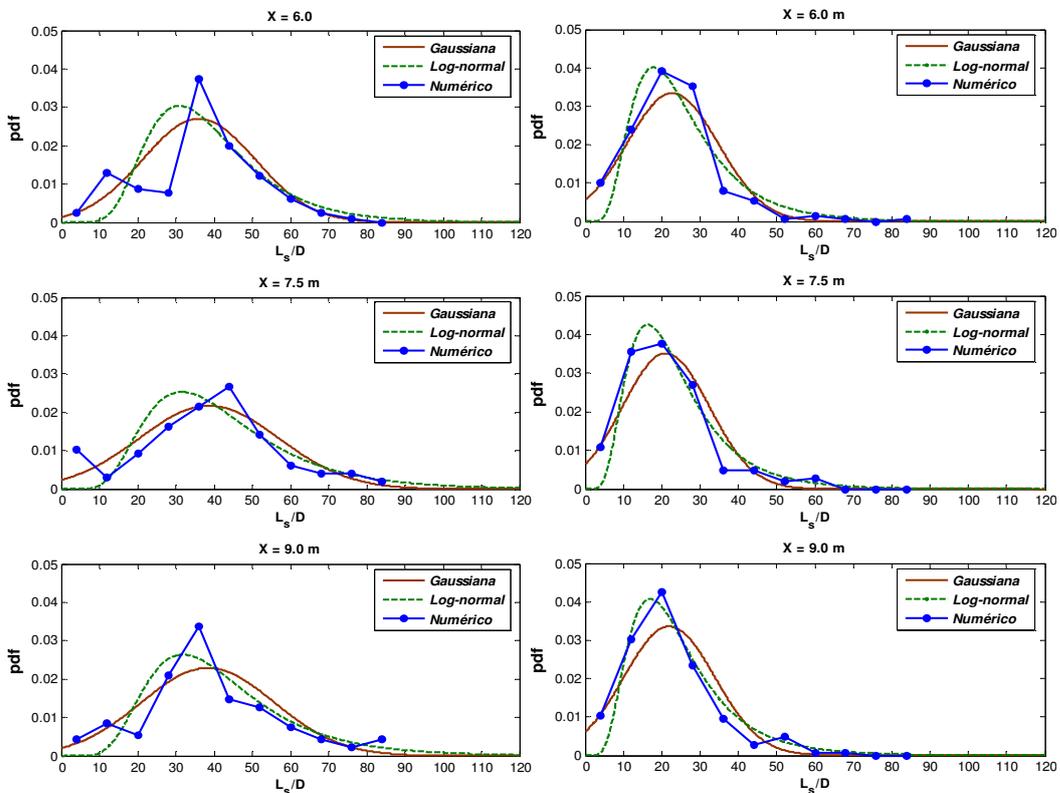
A Tabela 5.13 apresenta o erro-padrão referente a distribuição *normal* e *log-normal*, para cada coordenada, assim como o erro médio para os seis casos. Observa-se que ambas as distribuições representam razoavelmente bem a distribuição de comprimentos, sendo a distribuição *normal* um pouco superior. Este bom comportamento fornecido pela simulação numérica, também é uma indicação que algum problema pode ter ocorrido na obtenção dos dados experimentais referentes ao comprimento da golfada líquida.

As Figuras 5.26 e 5.28 ilustram a variação do comprimento médio da golfada líquida ao longo do duto. Observa-se que o comprimento médio das golfadas cresce ao longo da tubulação, tendendo a um valor constante, condizente com os resultados de velocidade de translação apresentados na seção anterior.



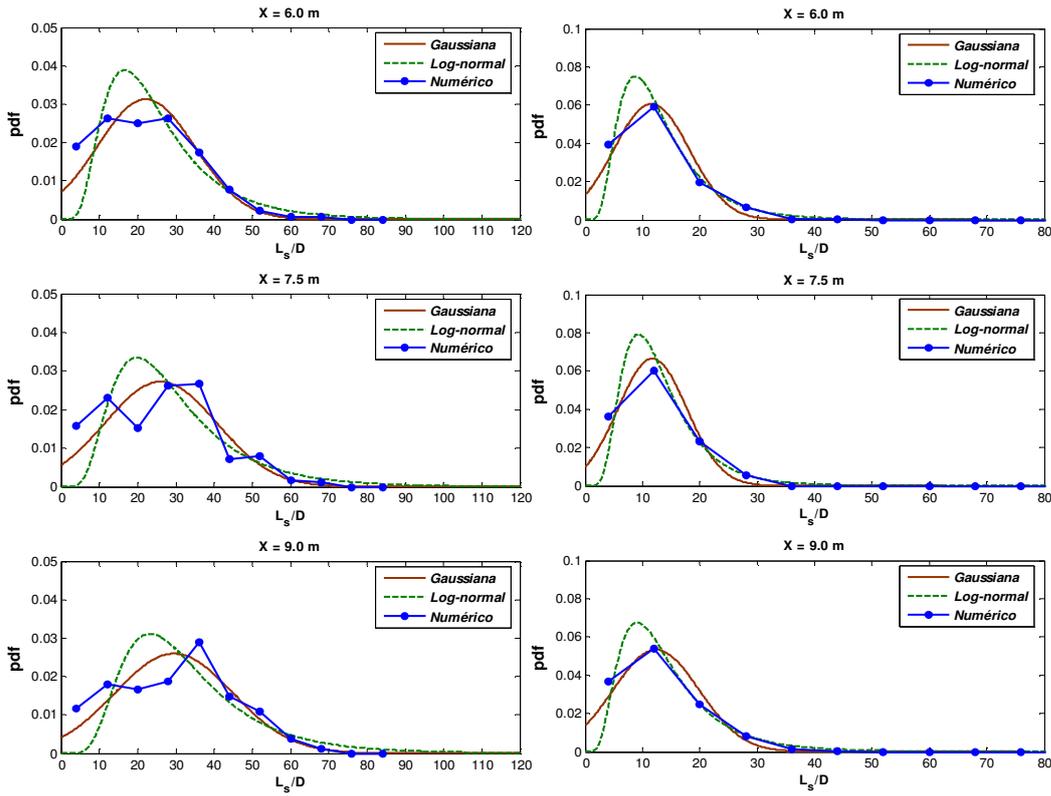
(a) Caso 1:  $U_{sL} = 0,295$  m/s,  $U_{sG} = 0,475$  m/s (b) Caso 4:  $U_{sL} = 0,295$  m/s,  $U_{sG} = 0,788$  m/s

Figura 5.26 – Distribuição PDF do Comprimento da Golfada para  $U_{sL} = 0,295$  m/s.



(a) Caso 2:  $U_{sL} = 0,393$  m/s,  $U_{sG} = 0,475$  m/s (b) Caso 5:  $U_{sL} = 0,393$  m/s,  $U_{sG} = 0,788$  m/s

Figura 5.27 – Distribuição PDF do Comprimento da Golfada para  $U_{sL} = 0,393$  m/s.



(a) Caso 3:  $U_{SL} = 0,516$  m/s,  $U_{SG} = 0,475$  m/s (b) Caso 6:  $U_{SL} = 0,516$  m/s,  $U_{SG} = 0,788$  m/s

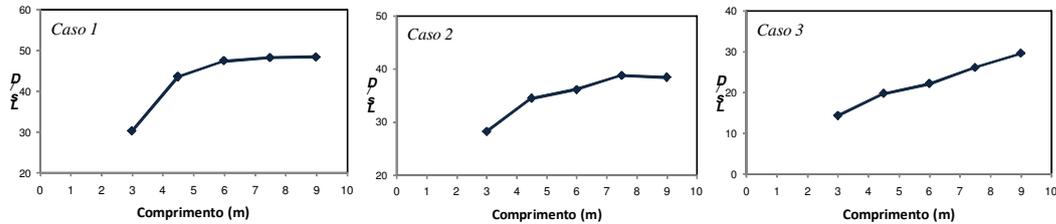
Figura 5.28 – Distribuição PDF do Comprimento da Golfada para  $U_{SL} = 0,516$  m/s.

Tabela 5.13 Determinação do Erro Padrão. Configuração 2

Posição (m)	Erro-padrão					
	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	<i>Normal</i>	<i>Log-normal</i>	<i>Normal</i>	<i>Log-normal</i>	<i>Normal</i>	<i>Log-normal</i>
6,0	0,78	0,82	0,74	0,97	0,37	0,80
7,5	0,35	0,33	0,43	0,59	0,55	0,92
9,0	0,65	0,61	0,59	0,59	0,44	0,81
Erro médio	0,60	0,59	0,59	0,71	0,45	0,84

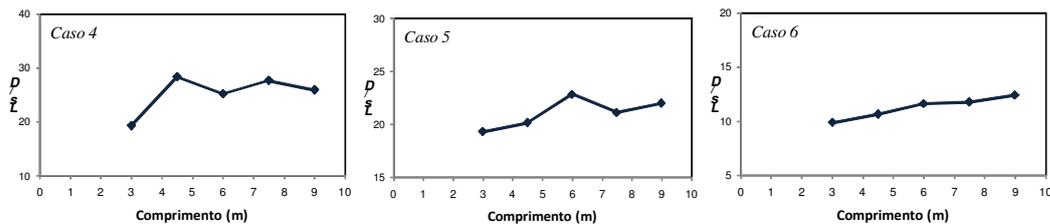
Posição (m)	Erro-padrão					
	Caso 4		Caso 5		Caso 6	
	<i>Normal</i>	<i>Log-normal</i>	<i>Normal</i>	<i>Log-normal</i>	<i>Normal</i>	<i>Log-normal</i>
6,0	0,58	0,50	0,48	0,56	0,69	0,55
7,5	0,47	0,40	0,53	0,47	0,60	0,74
9,0	0,48	0,55	0,63	0,44	0,65	0,53
Erro médio	0,51	0,48	0,55	0,49	0,65	0,60

Ainda analisando as Figs. 5.29 e 5.30, pode-se observar que os Casos 3 e 6 correspondentes a maior velocidade superficial do líquido apresentam um comprimento crescente ao longo de todo o duto, uma vez que as velocidades da frente e da cauda da golfada apresentam uma pequena diferença, como ilustrado nas Figs. 5.24e e 5.24f.



(a) Caso 1:  $U_{sL} = 0,295$  m/s    (b) Caso 2:  $U_{sL} = 0,393$  m/s    (c) Caso 3:  $U_{sL} = 0,516$  m/s

Figura 5.29 – Distribuição do Comprimento das Golfadas Líquidas ao Longo da Tubulação.  $U_{sG} = 0,475$  m/s



(a) Caso 4:  $U_{sL} = 0,295$  m/s    (b) Caso 5:  $U_{sL} = 0,393$  m/s    (c) Caso 6:  $U_{sL} = 0,516$  m/s

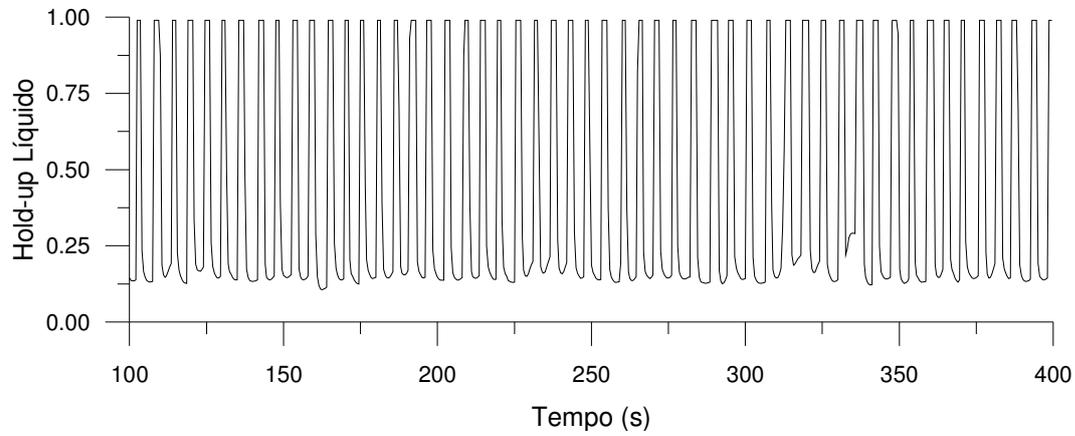
Figura 5.30 – Distribuição do comprimento das golfadas líquidas ao longo da tubulação.  $U_{sG} = 0,788$  m/s

### 5.2.3 Frequência das Golfadas

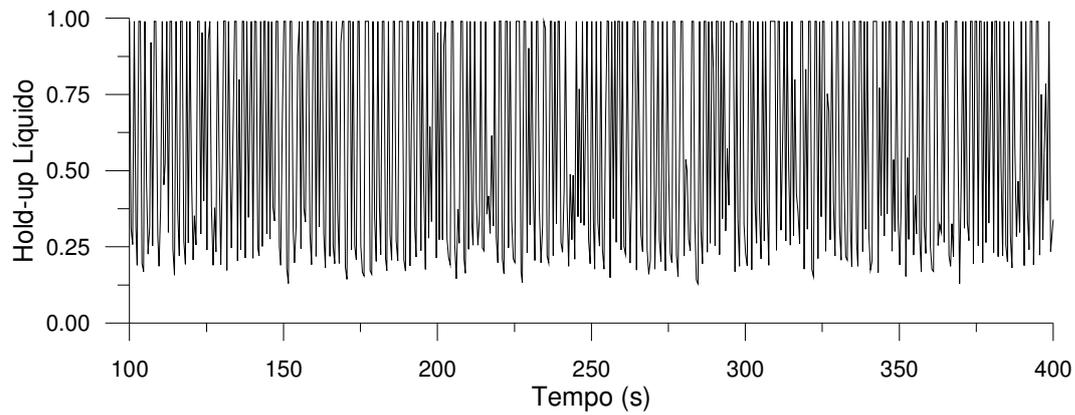
Como apresentado no Capítulo 4, a frequência da golfada é definida como o inverso do intervalo de tempo que decorre entre a passagem por um ponto fixo de duas frentes consecutivas de golfadas. Portanto, para o cálculo das frequências de passagem das golfadas foi determinado numericamente a distribuição temporal do *hold-up* do líquido, na mesma posição próxima na saída da tubulação ( $x = 9$  m), onde os dados experimentais foram medidos.

A Figura 5.31 ilustra esta distribuição para três casos (Casos 1, 3 e 5). Como observado nas Fig. 5.20, o Caso 1 com velocidade superficial de líquido mais

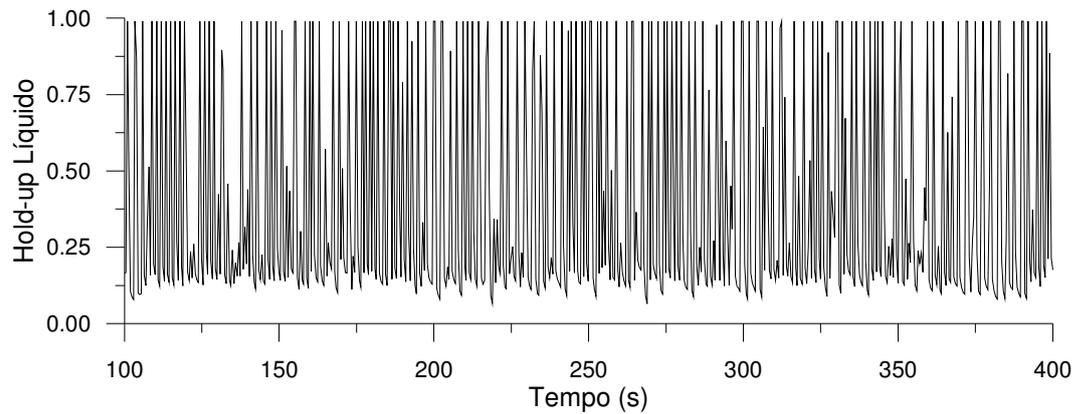
baixa apresenta uma frequência bem menor de golfadas que os outros dois casos. A distribuição de frequência para os mesmos três casos é apresentada na Fig. 5.32



(a) Caso 1:  $U_{sL} = 0,295$  m/s,  $U_{sG} = 0,475$  m/s

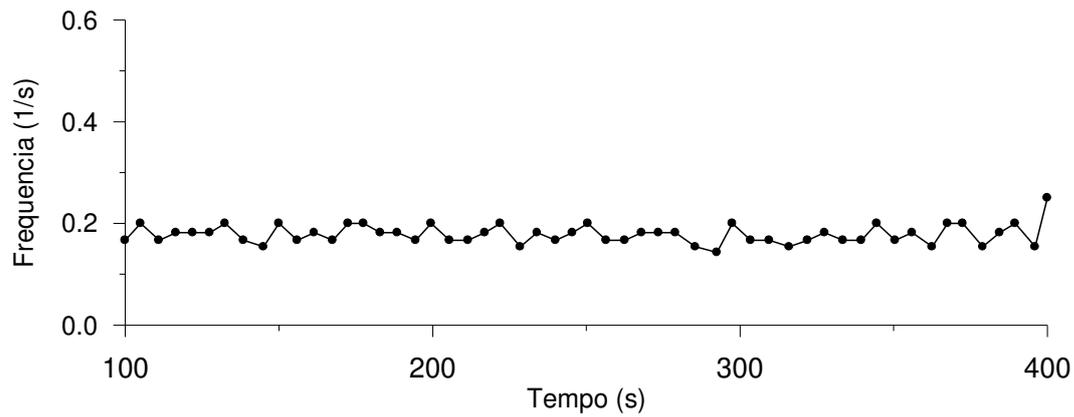
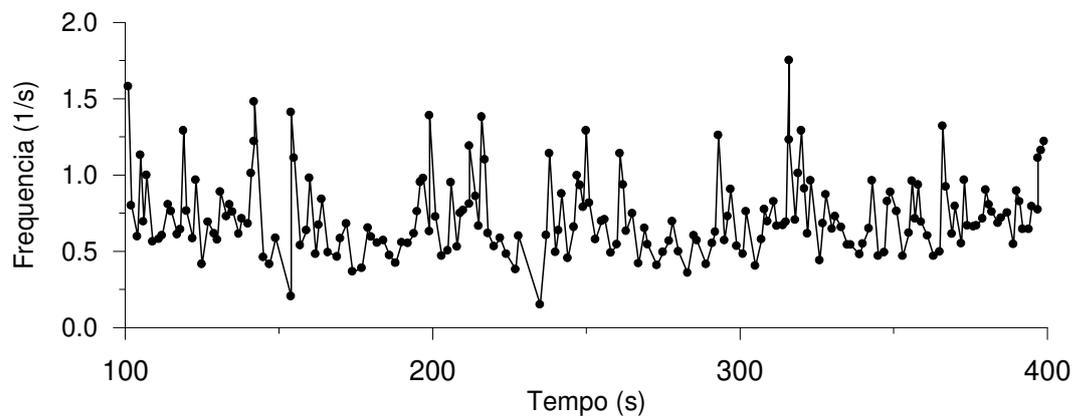
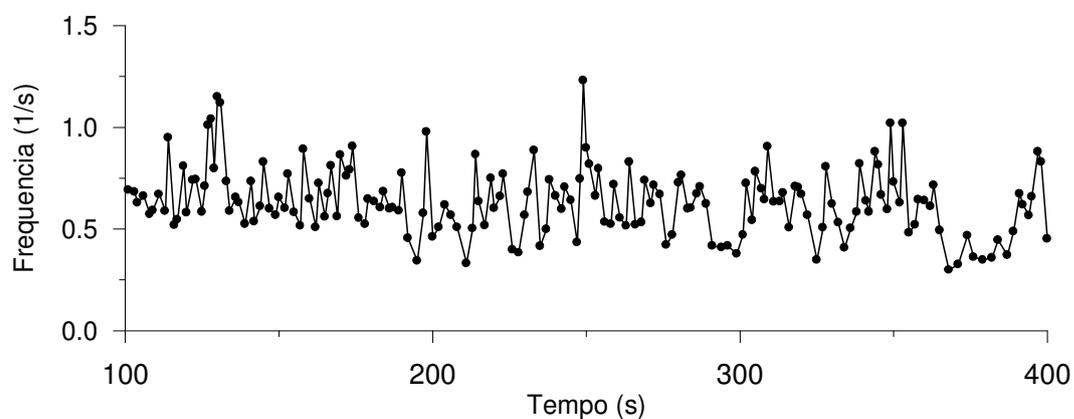


(b) Caso 3:  $U_{sL} = 0,516$  m/s,  $U_{sG} = 0,475$  m/s



(c) Caso 5:  $U_{sL} = 0,393$  m/s,  $U_{sG} = 0,788$  m/s

Figura 5.31 – Variação do *Hold-up* do Líquido com o Tempo em  $x = 9$  m.

(a) Caso 1:  $U_{sL} = 0,295$  m/s,  $U_{sG} = 0,475$  m/s(b) Caso 3:  $U_{sL} = 0,516$  m/s,  $U_{sG} = 0,475$  m/s(c) Caso 5:  $U_{sL} = 0,393$  m/s,  $U_{sG} = 0,788$  m/sFigura 5.32 – Distribuição da Frequência com o Tempo Obtido em  $x = 9$  m.

As distribuições de frequências ilustradas na Figura 5.32 confirmam a observação de que a frequência das golfadas cresce com o aumento da velocidade superficial do líquido. Estes resultados também confirmam que o regime estatisticamente permanente foi obtido para todos os casos.

A partir da variação temporal da frequência, pode-se determinar a frequência média, permitindo comparar com os dados medidos experimentalmente pro Fonseca (2009). Esta comparação é apresentada na Fig. 5.33, onde a variação da frequência média com a velocidade de mistura e velocidade superficial do líquido é apresentada. Pode-se observar que a frequência obtida experimentalmente é sempre superior aos valores numéricos, porém, ambos os dados apresentam a mesma tendência com relação ao aumento da velocidade da mistura. Pode-se apreciar também que os casos do Grupo 1 (menor velocidade de mistura), apresentam maior dispersão com relação aos dados experimentais, e que os casos do Grupo 2 apresentam uma concordância razoável. Os erros para os casos do Grupo 2 são da mesma ordem que os casos da Configuração1 (de 7 a 21 %). Vale notar que com a redução da velocidade superficial do gás, mantendo a velocidade superficial do líquido, numericamente foi previsto uma redução da frequência (Casos 1 e 4, Casos 2 e 5; Casos 3 e 6), porém este fato não observado experimentalmente. Por outro lado, tanto numericamente quanto experimentalmente, observou-se um aumento da frequência das golfadas com relação ao aumento da velocidade de líquido, mantendo a mesma velocidade do gás (Casos 1, 2 e 3 e Casos 4, 5 e 6).

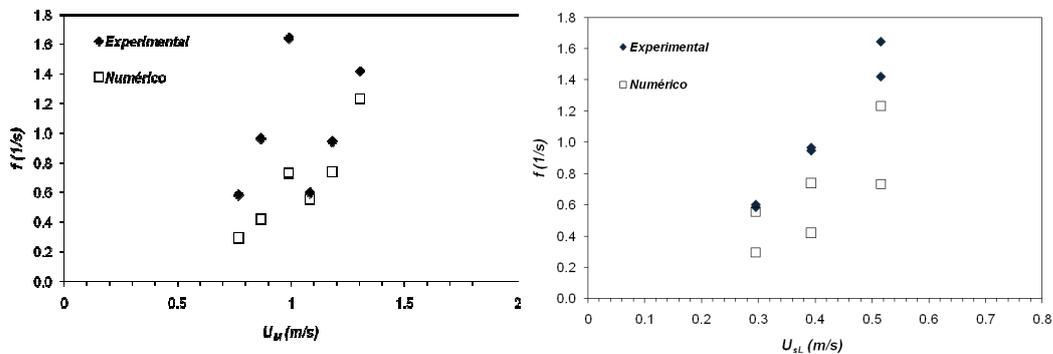


Figura 5.33 – Distribuição da Frequência Média no Domínio para os Casos da Configuração 2, em Função da Velocidade de Mistura e da Velocidade Superficial do Líquido.

## 5.2.4 Distribuição de Pressão

A variação coeficiente de pressão  $C_p$ , Eq. 5.3, ao longo da tubulação, referente aos seis casos desta configuração, encontra-se ilustrado na Fig. 5.34. Observa-se a região de desenvolvimento próximo da entrada do duto. Após a

coordenada aproximadamente igual a 3,0 m, a queda de pressão média possui um comportamento linear, típico de escoamento desenvolvido. Os Casos 1 e 4, correspondentes a velocidades superficial de líquido mais baixa, apresentam perturbações mais acentuadas que os outros casos.

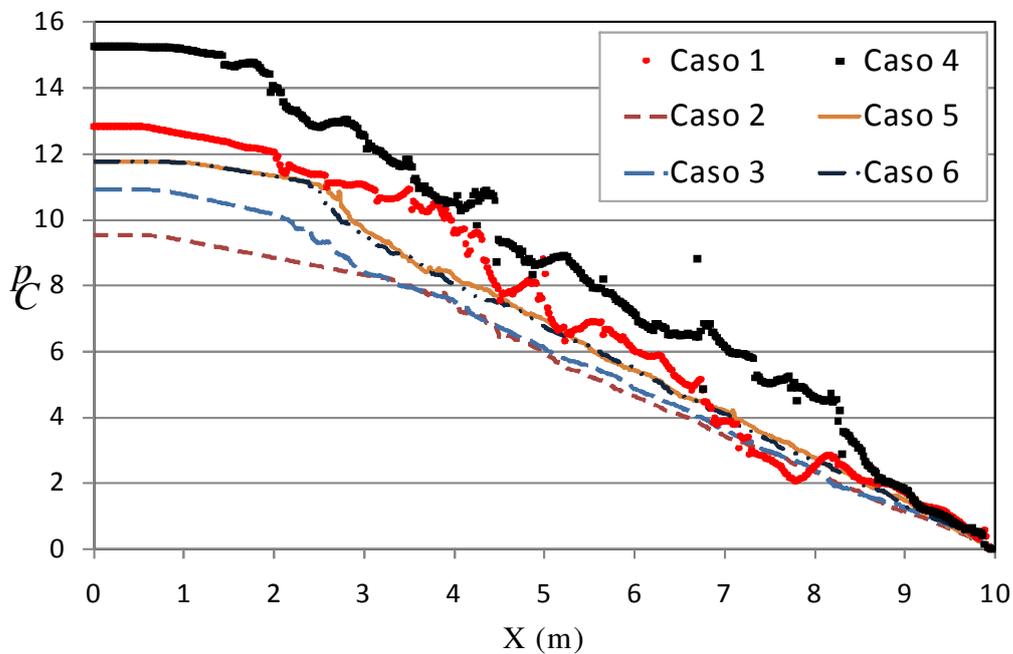


Figura 5.34 – Coeficiente de Pressão ao Longo do Duto. Casos 1, 2 e 3.

A queda da pressão média obtida numericamente também é comparada com a correlação de Lockhart- Matinelli (Eq. 5.4). Observa-se na Tabela 5.14 que os resultados obtidos comparam-se bem com a correlação empírica, com erros de 10 a 20%, com exceção do caso 4 que apresentou um erro maior.

Tabela 5.14 – Queda de Pressão Média. Configuração 2

	<b>L-M</b>	<b>Num</b>	<b>Erro (%)</b>
Caso1	164,90	191,47	16,12
Caso2	250,75	200,72	19,95
Caso3	377,94	309,79	18,03
Caso4	184,48	282,08	52,91
Caso5	276,10	322,52	16,82
Caso6	410,29	452,19	10,21