

6 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados para o escoamento intermitente horizontal e inclinado, obtidos a partir das técnicas implementadas e descritas nos capítulos anteriores do presente trabalho.

A apresentação será iniciada pelos resultados globais obtidos da análise estatística do escoamento intermitente seguido de uma comparação com resultados disponíveis na literatura. Em seguida, serão apresentados resultados detalhados sobre o campo de escoamento instantâneo e médio nas vizinhanças do nariz e da cauda da bolha de gás obtidos pelas técnicas ópticas implementadas.

6.1. Matriz de testes

A matriz contendo as características dos escoamentos estudados no presente trabalho é apresentada na Tabela 6.1 Além das velocidades superficiais das fases, são apresentados os números adimensionais de Froude (Fr_m), de Reynolds (Re_{mist}) e número de Eötvös (Σ).

Analizando o diagrama de padrões de escoamento, Figura 6.1, é possível observar que os valores utilizados no teste concentraram-se no padrão de bolhas alongadas (ou *plug flow*). Esta restrição foi motivada, parte por limitação do rotâmetro utilizado para a medição de vazão de líquido e parte por limitação do método óptico utilizado na medição do escoamento, cujo apresentava problemas na presença de bolhas dispersas no pistão de líquido, como será discutido posteriormente. Os testes foram realizados para a posição horizontal e para uma inclinação do sistema de 5 graus.

Tabela 6.1- Matriz dos testes realizados

Teste	U_{LS} (m/s)	U_{GS} (m/s)	U_m (m/s)	Fr_M	Re_M	Σ	Nomenclatura
1	0.3	0.5	0.8	1.6	1.8E+04	75	ULS03UGS05
2	0.4	0.5	0.9	1.8	2.1E+04	75	ULS04UGS05
3	0.5	0.5	1.0	2.1	2.4E+04	75	ULS05UGS05
4	0.3	0.8	1.1	2.3	2.6E+04	75	ULS03UGS08
5	0.4	0.8	1.2	2.5	2.8E+04	75	ULS04UGS08
6	0.5	0.8	1.3	2.7	3.1E+04	75	ULS05UGS08

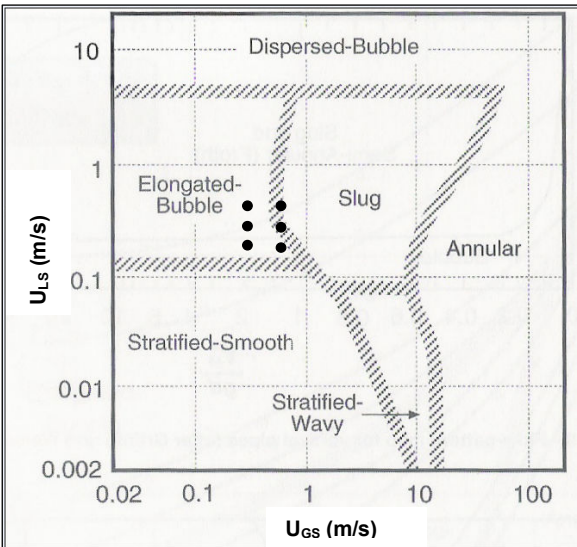


Figura 6.1 – Identificação dos pontos de teste no mapa de padrões de escoamento água e ar em tubos com diâmetro de 1 polegada, segundo Mandhane et al 1974.

6.2.
Velocidade de propagação das bolhas

São apresentados a seguir na tabela 6.2 os valores de velocidade média de propagação das bolhas para os 6 casos investigados.

É possível observar na tabela que a velocidade da bolha aumenta com o aumento na velocidade da mistura. Comparando o escoamento horizontal com o inclinado, nota-se que a bolha se desloca com menor velocidade para o tubo inclinado, fato este que deve ser associado à ação da gravidade sobre a bolha a partir da inclinação do sistema.

Tabela 6.2 – Velocidade de propagação das bolhas para escoamento horizontal e inclinado a 5 graus.

Teste	U_m (m/s)	F_{rm}	Horizontal	Inclinado
			u_t (m/s)	u_t (m/s)
1	0.8	1.6	1.27	1.16
2	0.9	1.8	1.44	1.30
3	1.0	2.1	1.54	1.48
4	1.1	2.3	1.58	1.52
5	1.2	2.5	1.76	1.75
6	1.3	2.7	1.95	1.88

Nas figuras 6.2 e 6.3, os resultados obtidos no presente trabalho são comparados com resultados encontrados na literatura para uma mesma faixa do número de *Froude*, tanto no escoamento horizontal quanto no inclinado.

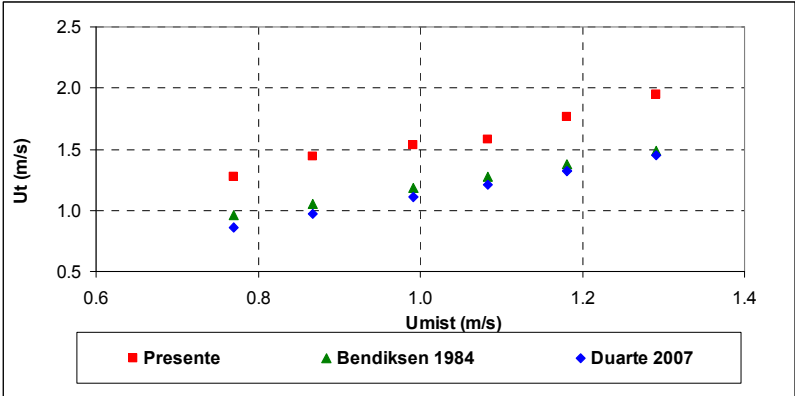


Figura 6.2 – Comparação entre resultados de medição de velocidade de bolhas para escoamento horizontal ($F_{rm} < 2$).

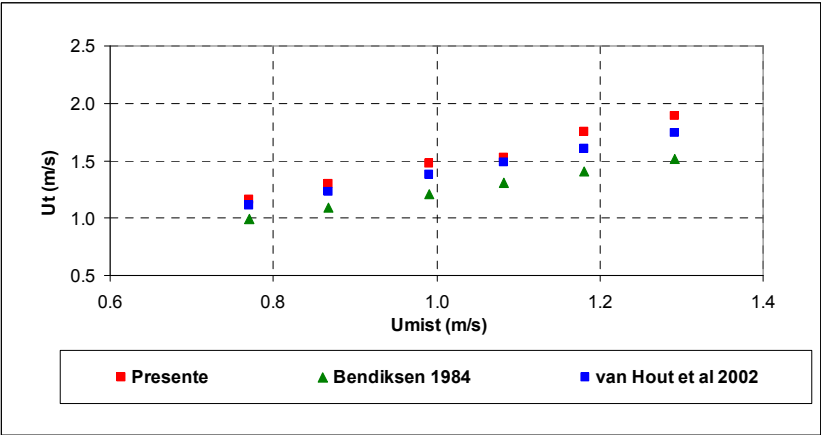


Figura 6.3 – Comparação entre resultados de medição de velocidade de bolhas para escoamento inclinado (+5 graus em todos os casos) para ($F_{rm} < 2$).

Com base nos resultados medidos, as constantes C_0 e u_d (velocidade de deslizamento) definidas na equação 2.12 são apresentadas na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Constantes C_0 e u_d para escoamento horizontal e inclinado após medição do presente trabalho.

Escoamento	C_0	u_d (m/s)
Horizontal	1.2	0.354
Inclinado	1.4	0.088

Um resumo dos valores das constantes adotadas nos testes realizados por outros autores e a respectiva faixa de medição é apresentado na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Resumo dos resultados experimentais para C_0 e u_d da literatura.

	Autor	Escoamento		Diâmetro (mm)	C ₀	u _d (m/s)	Transição	Obs
Escoamento Horizontal	Bendiksen 1984	única bolha	U _L >0	24.2	1.009	0.181	0,6 < Fr < 2,3	
					1.067	0.145	2,4 < Fr < 3,5	
					1.200	0.000	Fr>3,5	
	Duarte 2007	2 fases contínuas	26	1.12	0	2,0 < Fr < 4,6	Água e ar	
				1.28	1		Glicerina e ar	
Escoamento Inclinado	Bendiksen 1984	única bolha	U _L =0	24.2		$u_d(E_o, \theta) = u_d^h(E_o, \alpha) \cos \theta + u_d^v(E_o, \alpha) \sin \theta$		5 graus
			U _L >0		0.999	0.222	0,6 < Fr < 2,3	
					1.09	0.16	2,5 < Fr < 3,5	
					1.2	$u_d = u_d^v(E_o, \theta = 90^\circ) . \sin(\theta)$	Fr>3,5	
	van Hout et al 2002	2 fases contínuas	24	1.2	0.194	5 graus		

Analisando o escoamento horizontal, a partir da figura 6.2, nota-se que os resultados encontrados no presente trabalho apresentaram-se superiores quando comparado com os trabalhos da literatura de diâmetro semelhante. Este fato pode estar associado à distância entre a seção de medição e a saída da tubulação (45 diâmetros). O fato deste trecho se apresentar com comprimento curto influenciou no comportamento do escoamento da bolha, acelerando-a.

Na figura 6.3, os resultados encontrados para o escoamento inclinado, apesar de apresentam-se próximos aos resultados obtidos por van Hout et al (2002), novamente o escoamento pode ter sido influenciado pela pequena distância em relação à saída da tubulação.

6.3.

Análise estatística das variáveis globais do escoamento intermitente

Nesta seção serão apresentados os resultados do comportamento das variáveis analisadas para cada conjunto *slug* (bolha + pistão) durante o período de testes. Para cada variável, foi feito um histograma com distribuição de frequência dos valores medidos. Para todos os pares de vazões da matriz de teste apresentada anteriormente, a aquisição de dados foi realizada com uma frequência de amostragem de 1kHz durante o período de 3600 segundos.

6.3.1.

Velocidade das bolhas

Nas tabelas 6.5 e 6.6 são resumidos os resultados obtidos para a avaliação da velocidade de propagação das bolhas no escoamento horizontal e inclinado respectivamente. Conforme mencionado anteriormente, para esta variável foram desprezados resultados que apresentassem um valor 50% superior ao resultado previsto pela relação proposta por *Nicklin et al 1962*. A quinta e sexta colunas das tabelas indicam, respectivamente, o número total de eventos de passagem de bolhas coletados e aqueles considerados válidos pelo critério mencionado anteriormente. A sexta coluna das tabelas indica o percentual do total destes eventos considerados válidos. Estes valores foram medidos com base na velocidade de deslocamento da frente da bolha.

Tabela 6.5 – Resultados de medição da velocidade média de propagação das bolhas para escoamento horizontal.

Teste Horizontal	U_{Ls} (m/s)	U_{Gs} (m/s)	U_m (m/s)	Qtde total	Válidos	(%) Analisado	Vel média (m/s)	desvio padrão vel media
1	0.3	0.5	0.8	1910	1822	95%	1.27	0.20
2	0.4	0.5	0.9	3122	2888	93%	1.44	0.24
3	0.5	0.5	1.0	5259	4805	91%	1.54	0.26
4	0.3	0.8	1.1	1856	1635	88%	1.58	0.30
5	0.4	0.8	1.2	2928	2566	88%	1.76	0.34
6	0.5	0.8	1.3	4360	3187	73%	1.95	0.37

Tabela 6.6 – Resultados de medição da velocidade média de propagação das bolhas para escoamento inclinado a 5°.

Teste Inclinado	U_{Ls} (m/s)	U_{Gs} (m/s)	U_m (m/s)	Qtde total	Válidos	(%) Analisado	Vel média (m/s)	desvio padrão vel média
1	0.3	0.5	0.8	3326	3304	99%	1.16	0.14
2	0.4	0.5	0.9	4318	4216	98%	1.30	0.20
3	0.5	0.5	1.0	5880	5359	91%	1.48	0.24
4	0.3	0.8	1.1	3186	3057	96%	1.52	0.22
5	0.4	0.8	1.2	4057	3612	89%	1.75	0.32
6	0.5	0.8	1.3	5124	3615	71%	1.88	0.34

Uma observação dos resultados apresentados na Tabela 6.5 indica que, a velocidade média das bolhas de gás aumenta com o aumento da velocidade mistura, (U_m). Pode-se observar também que o aumento da velocidade de mistura provoca um aumento na dispersão dos valores da velocidade média, como indicado pelo aumento no valor do desvio padrão reportado na última coluna da tabela. O percentual de eventos considerados válidos também diminui como consequência do aumento da dispersão dos valores da velocidade da bolha.

As mesmas tendências mencionadas para a configuração horizontal podem ser observadas para a configuração do tubo inclinado a 5° cujos resultados são apresentados na Tabela 6.6. Comparando-se os resultados para o tubo horizontal e inclinado percebe-se que as bolhas de gás no caso do tubo inclinado movem-se com velocidade média um pouco inferior à velocidade verificada no caso horizontal.

Conforme já mencionado anteriormente, os experimentos foram realizados com um tempo de aquisição fixo de 3600 segundos para cada par de vazão da matriz de teste. Desta forma, analisando as tabelas anteriores, é possível constatar que o aumento da vazão de líquido acarretou em uma quantidade maior de bolhas no escoamento, o que significa um aumento da frequência de passagem das mesmas.

A dispersão da velocidade em torno do valor médio é menor para o caso do tubo inclinado. Estas informações podem ser melhor visualizadas com o auxílio dos gráficos de barras apresentados nas Figuras 6.4 e 6.5.

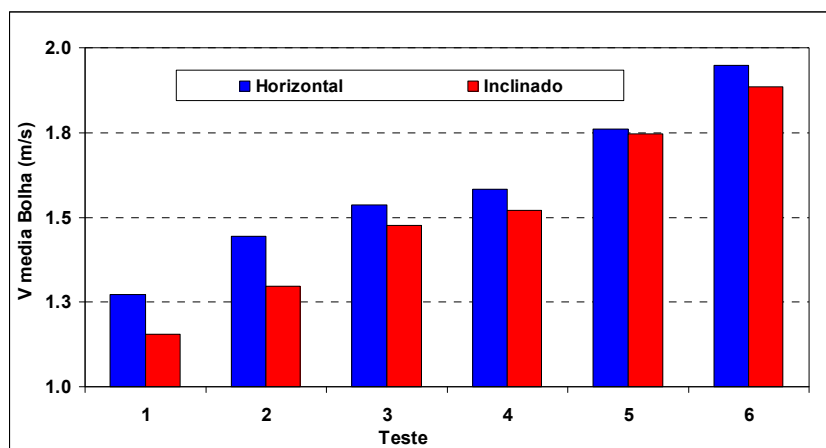


Figura 6.4 – Comparação da velocidade média de propagação das bolhas para os casos horizontal e inclinado a 5° .

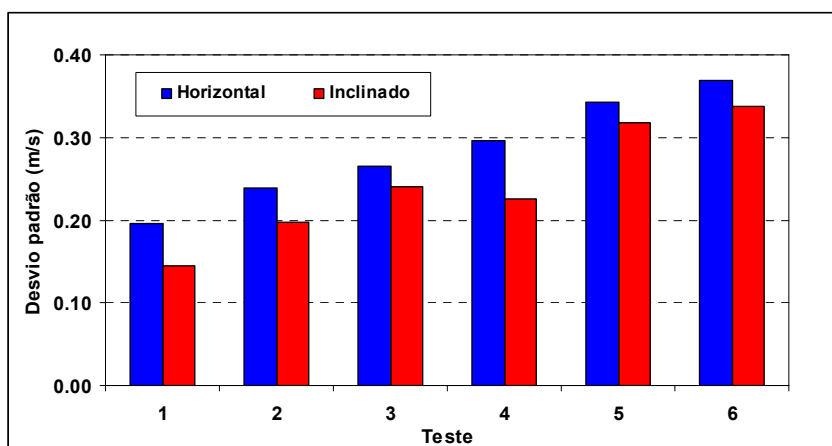


Figura 6.5 – Comparação do desvio padrão da velocidade de propagação das bolhas para os casos horizontal e inclinado a 5° .

As distribuições de probabilidade de ocorrência das velocidades das bolhas são apresentadas nas figuras 6.6 e 6.7, respectivamente para os casos horizontal e inclinado. Pode-se observar nas figuras uma tendência, tanto para o caso horizontal quanto para o inclinado, da distribuição de velocidade perder a simetria em torno da média à medida que a velocidade de mistura aumenta. De fato, tanto no caso horizontal como no inclinado, os testes 1, 2, 3 e 4 apresentam distribuição mais simétrica que os casos 5 e 6.

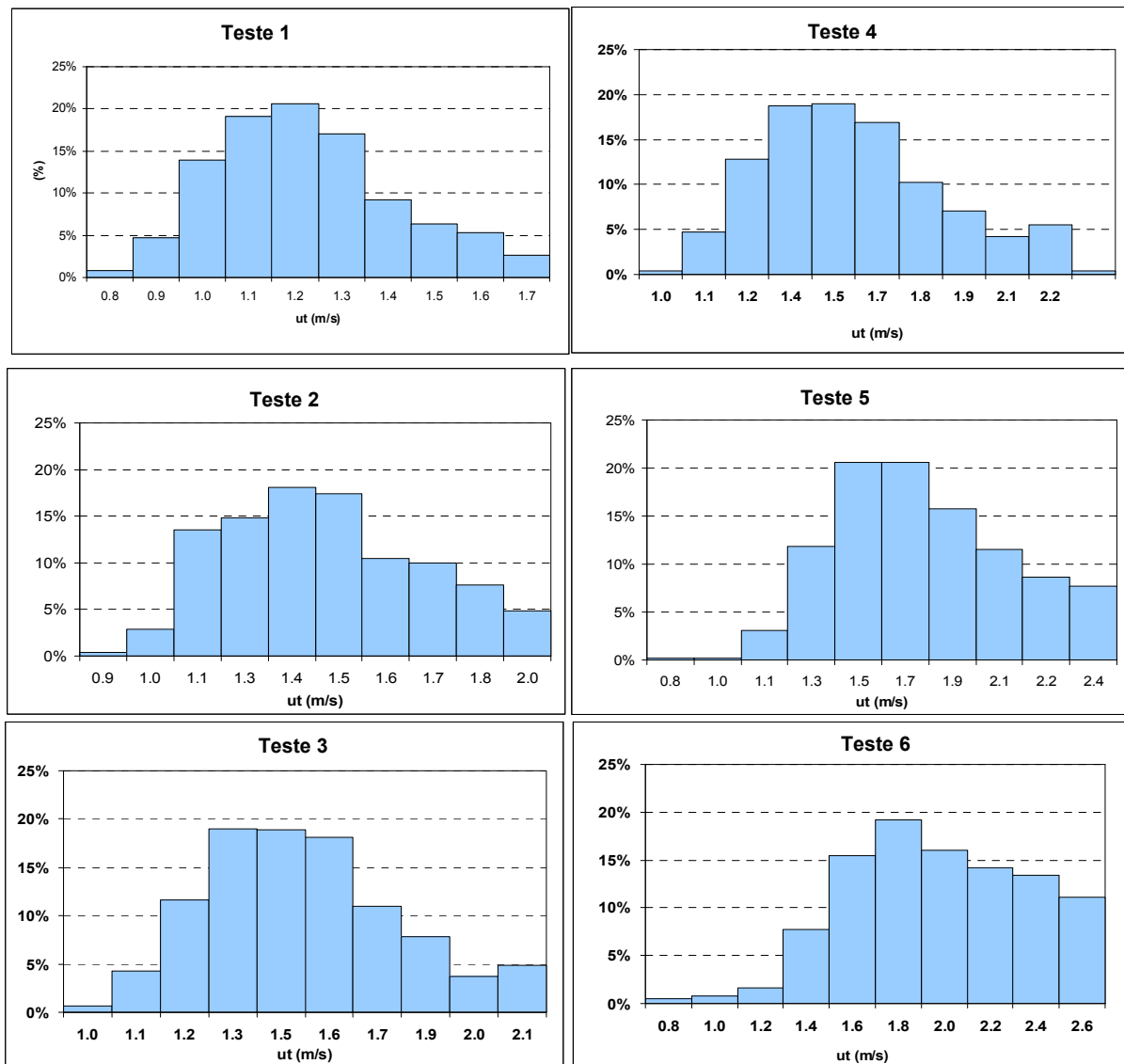


Figura 6.6 – Distribuição de probabilidade das velocidades das bolhas para o escoamento horizontal.

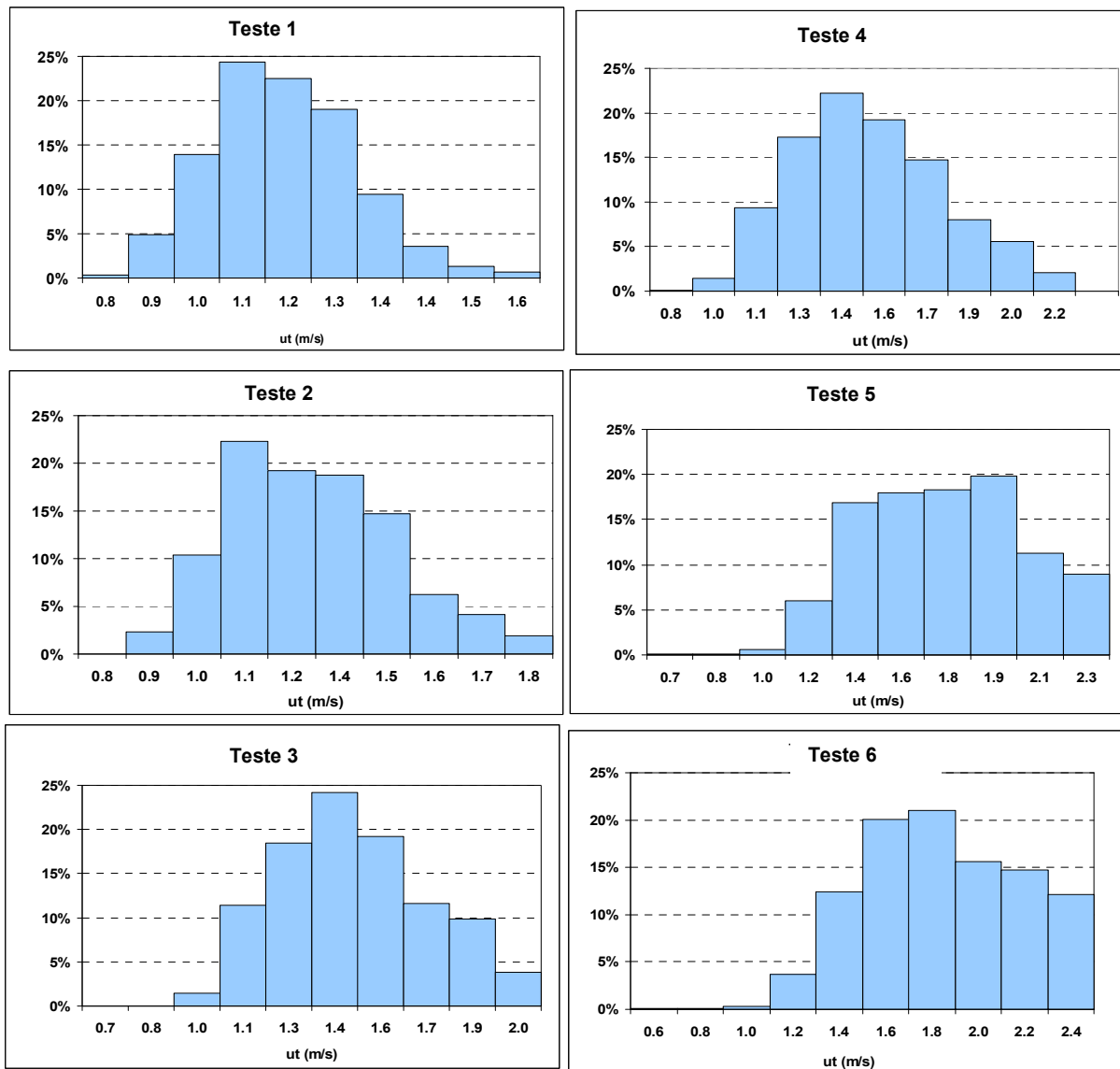


Figura 6.7 – Distribuição de probabilidade das velocidades das bolhas para o escoamento inclinado a 5° .

6.3.2. Comprimento das bolhas

A análise da distribuição dos resultados para o comprimento das bolhas foi realizada sobre os dados já selecionados pelo critério utilizado no caso da velocidade de bolha não superior ao valor previsto por *Nicklin et al 1962*, conforme indicado na seção anterior. Por esta razão, o mesmo número de medidas foi utilizado nas análises de velocidade e comprimento de bolha.

Os resultados de comprimentos de bolhas médios para as seis configurações estudadas são apresentados nas Tabelas 6.7 e 6.8, respectivamente para os casos horizontal e inclinado a 5°.

Tabela 6.7 – Resultados de medição do comprimento médio das bolhas para escoamento horizontal.

Teste Horizontal	U_{LS} (m/s)	U_{GS} (m/s)	U_m (m/s)	L medio (m)	desvio padrao	Bolha - L/D
1	0.3	0.5	0.8	1.81	0.58	75.2
2	0.4	0.5	0.9	1.18	0.45	49.1
3	0.5	0.5	1.0	0.64	0.25	26.8
4	0.3	0.8	1.1	2.63	0.95	109.7
5	0.4	0.8	1.2	1.63	0.63	68.0
6	0.5	0.8	1.3	1.08	0.44	45.1

Tabela 6.8 – Resultados de medição do comprimento médio das bolhas para escoamento inclinado a 5°.

Teste Inclinado	U_{LS} (m/s)	U_{GS} (m/s)	U_m (m/s)	L medio (m)	desvio padrao	Bolha - L/D
1	0.3	0.5	0.8	0.788	0.262	32.8
2	0.4	0.5	0.9	0.635	0.219	26.5
3	0.5	0.5	1.0	0.504	0.180	21.0
4	0.3	0.8	1.1	1.256	0.464	52.3
5	0.4	0.8	1.2	1.092	0.410	45.5
6	0.5	0.8	1.3	0.817	0.312	34.0

Uma análise dos resultados apresentados nas tabelas indica que, para uma dada vazão de gás, o comprimento médio das bolhas diminui com o aumento da vazão de líquido, tanto para escoamento horizontal quanto para o levemente inclinado. Verifica-se também, que, para as mesmas vazões de líquido e gás, que o comprimento médio dos pistões é menor para o tubo inclinado quando comparado ao horizontal.

Nas Figuras 6.8 e 6.9, as distribuições de probabilidade de ocorrência dos comprimentos das bolhas são apresentadas.

Na figura 6.8 observa-se que o aumento da velocidade de mistura promove um aumento na dispersão dos resultados encontrados em torno da média. Ao contrário, analisando a figura 6.9 pode-se dizer que no escoamento inclinado a distribuição estatística do comprimento da bolha apresenta-se melhor comportada ao redor da média.

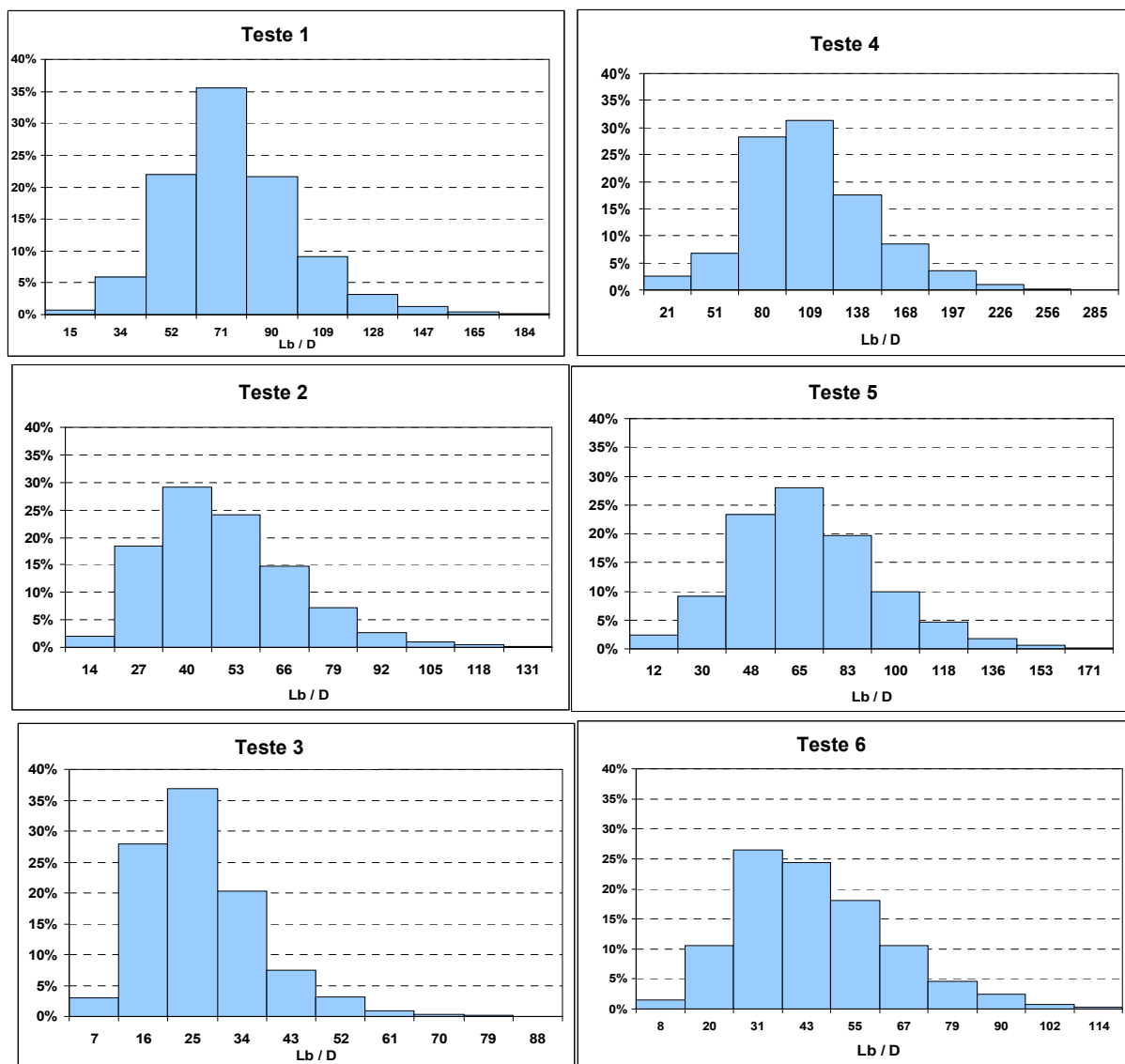


Figura 6.8 – Distribuição de probabilidade dos comprimentos das bolhas no escoamento horizontal.

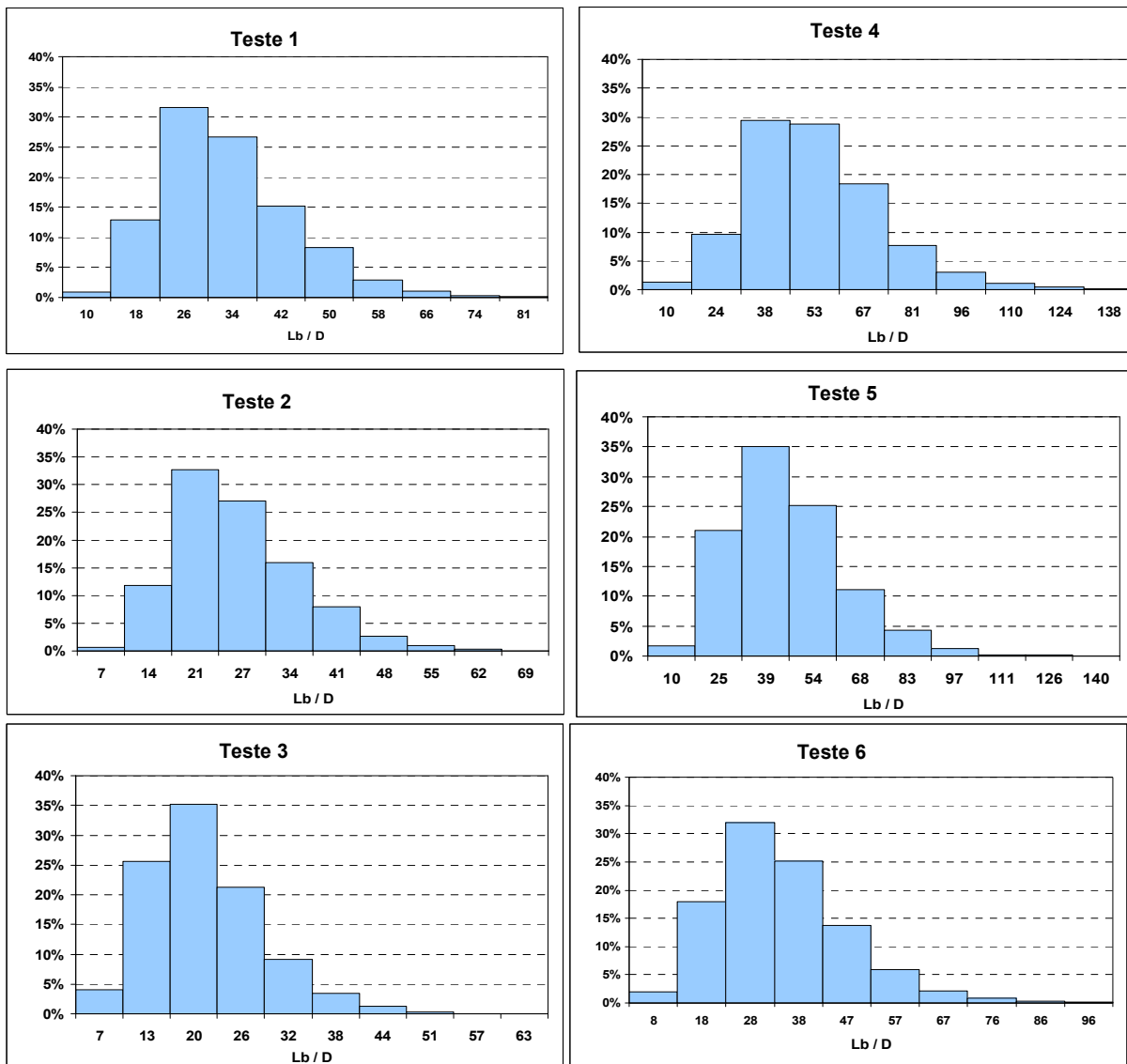


Figura 6.9 – Distribuição de probabilidade dos comprimentos das bolhas para o escoamento inclinado a 50.

6.3.3.

Velocidade da cauda da bolha (Velocidade do pistão de líquido)

Conforme citado anteriormente, os sinais emitidos durante a passagem da cauda da bolha pelos sensores ópticos permitiram a medição da velocidade da cauda e também foram alvo de análise no presente trabalho. A velocidade da cauda da bolha é considerada igual à velocidade da frente do pistão de líquido.

Os resultados obtidos para a velocidade média da cauda das bolhas são apresentados nas Tabelas 6.9 e 6.10, respectivamente para o tubo horizontal e inclinado a 5°.

O critério de Chauvenet descrito no Capítulo 5 foi utilizado para eliminar medidas espúrias com baixa probabilidade de pertencerem à amostra considerada no cálculo da média da velocidade da bolha. Na análise dos resultados apresentados nas Tabelas 6.9 e 6.10 observa-se que um número insignificante de medidas foi descartada pela utilização deste critério. Isto pode ser observado pela comparação dos resultados apresentados na quarta, quinta e sexta colunas das tabelas, onde a quantidade total de pontos analisados, o número de medidas consideradas válidas pelo critério e o percentual de medidas válidas são apresentados.

Os resultados apresentados indicam que, para as seis configurações de vazões de líquido e gás investigadas, a velocidade média da cauda das bolhas de gás aumenta com a vazão de líquido para uma vazão de gás fixa, assim como aumenta com a vazão de gás para uma vazão de líquido fixa. Estas observações se aplicam tanto para o caso horizontal quanto para o inclinado.

A dispersão dos valores da velocidade da cauda em torno do valor médio representada pelo desvio padrão apresentado na última coluna das tabelas indica uma relativa insensibilidade à variação das vazões de gás ou líquido. A mudança da configuração horizontal para a inclinada a 5°, no entanto, revela um menor nível de dispersão para o caso inclinado.

Tabela 6.9 – Velocidade média e desvio padrão dos pistões para escoamento horizontal.

Teste Horizontal	U_{Ls} (m/s)	U_{Gs} (m/s)	Quant. Total	Válidos	(%) Analisado	Vel média (m/s)	Desvio Padrão
1	0.3	0.5	1911	1903	99.6%	0.98	0.20
2	0.4	0.5	3122	3101	99.3%	1.06	0.20
3	0.5	0.5	5259	5228	99.4%	1.20	0.18
4	0.3	0.8	1856	1832	98.7%	1.32	0.26
5	0.4	0.8	2928	2886	98.6%	1.35	0.22
6	0.5	0.8	4360	4296	98.5%	1.52	0.24

Tabela 6.10 – Velocidade média e desvio padrão dos pistões para escoamento inclinado.

Teste Inclinado	U_{Ls} (m/s)	U_{Gs} (m/s)	Quant. Total	Válidos	(%) Analisado	Vel média (m/s)	Desvio Padrão
1	0.3	0.5	3326	3320	99.8%	0.93	0.10
2	0.4	0.5	4317	4305	99.7%	1.07	0.11
3	0.5	0.5	5880	5858	99.6%	1.23	0.15
4	0.3	0.8	3170	3148	99.3%	1.21	0.15
5	0.4	0.8	3964	3909	98.6%	1.38	0.18
6	0.5	0.8	5124	5071	99.0%	1.55	0.22

Os resultados obtidos permitem realizar uma comparação entre a velocidade da bolha apresentada na Tabela 6.2 e a velocidade do pistão apresentada nas Tabelas 6.9 e 6.10. Esta comparação pode ser verificada na Tabela 6.11 onde a razão entre as velocidades da bolha e do pistão de líquido, u_t/V_p e u_t-V_p , é apresentada para cada uma das seis configurações estudadas na posição horizontal e inclinada a 5°.

Os dados da Tabela 6.11 indicam para o caso horizontal que a velocidade da bolha é cerca de 30% superior à velocidade do pistão. Já para o caso inclinado, a razão de velocidade é menor, sendo de aproximadamente 20%. Na mesma tabela é apresentada a diferença entre as duas velocidades, observando-se mais uma vez, uma grande diferença entre a velocidade do nariz da bolha e da sua cauda. Esta diferença pode indicar que o escoamento ainda não se encontrava plenamente desenvolvido no ponto onde as medidas foram efetuadas. Ou então, esta diferença pode estar associada ao fato da distância

entre o ponto de medição e o final da tubulação (45D) ser menor que o comprimento médio da bolha. Durante a saída do nariz da bolha, há uma tendência de desaceleração de sua traseira antes e este processo ocorria antes da sua medição de velocidade.

Tabela 6.11 – Relação entre a velocidade medida do nariz da bolha e a velocidade medida de sua cauda.

Teste	U_t/V_p		U_t-V_p (m/s)	
	Horizontal	Inclinado	Horizontal	Inclinado
1	1.30	1.25	0.29	0.23
2	1.36	1.21	0.38	0.23
3	1.28	1.20	0.34	0.25
4	1.20	1.26	0.26	0.31
5	1.30	1.27	0.41	0.37
6	1.28	1.21	0.43	0.33

As distribuições de probabilidade dos resultados da velocidade da cauda da bolha (frente do pistão de líquido) são apresentadas nas Figuras 6.10 e 6.11.

Tanto para o caso horizontal quanto para o inclinado percebe-se por uma análise das figuras que as distribuições de velocidade são aproximadamente simétricas, e que este comportamento não se altera com o aumento da vazão das fases. Nota-se, comparando-se as distribuições das duas figuras, que a dispersão dos resultados em torno da média é menor para o caso inclinado.

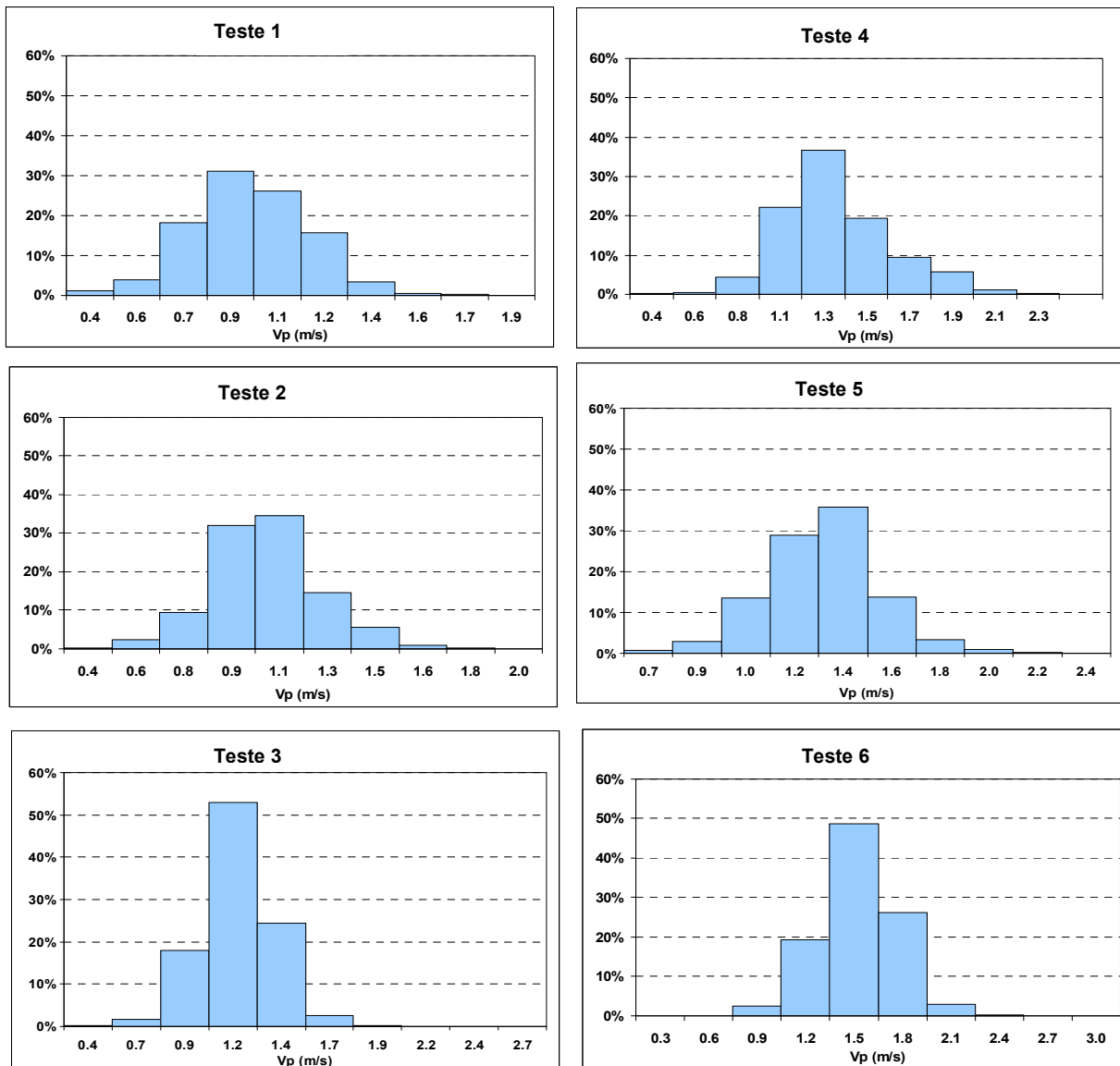


Figura 6.10 – Distribuição de probabilidade da velocidade dos pistões de líquido para escoamento horizontal.

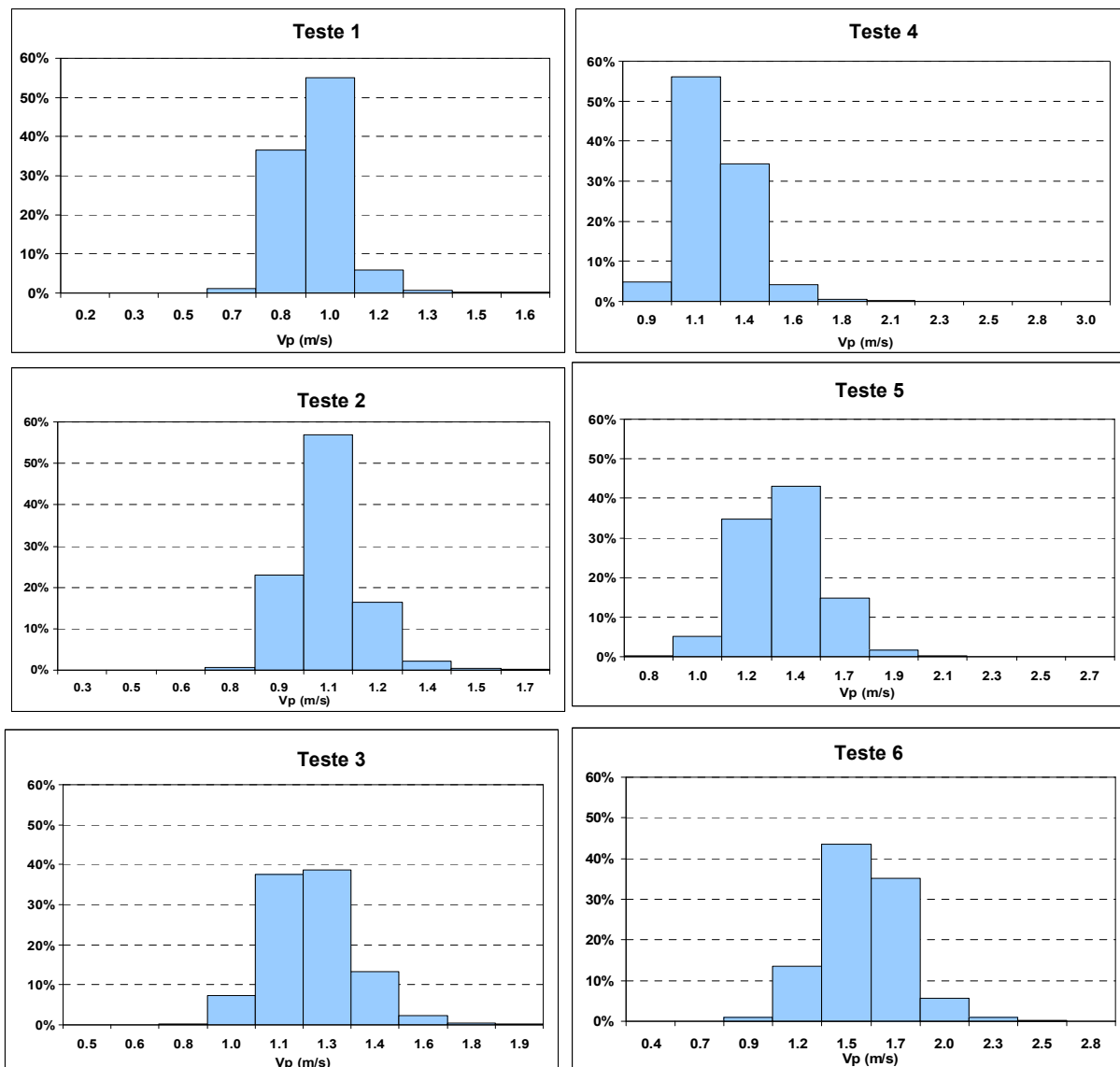


Figura 6.11 – Distribuição de probabilidade da velocidade dos pistões de líquido para escoamento inclinado a 5° .

6.3.4. Comprimento do pistão de líquido.

Os resultados para o comprimento médio do pistão de líquido, obtidos a partir dos procedimentos descritos na seção 5.6.3, são apresentados nas Tabelas 6.12 e 6.13 para as configurações horizontal e inclinada. As tabelas apresentam também os desvios dos resultados em torno do valor médio para cada configuração testada.

Os resultados apresentados indicam que para o escoamento horizontal, o comprimento médio dos pistões encontra-se na faixa de 13 a 19 diâmetros, enquanto que para a configuração inclinada, o comprimento situou-se na faixa de 14 a 16 diâmetros.

Analisando-se o escoamento horizontal, nota-se que o comprimento do pistão apresentou uma tendência de diminuição com o aumento da vazão de líquido. Este comportamento também foi observado por *Duarte 2007* em seu trabalho experimental previamente citado. Já para o escoamento inclinado, o comprimento do pistão apresentou-se praticamente constante para os testes realizados. A análise dos resultados das Tabelas indica que o comprimento do pistão de líquido tende a ser menos sensível à variação da velocidade superficial do gás, para a velocidade superficial do líquido fixa.

Do ponto de vista da dispersão dos resultados em torno do valor médio, os resultados obtidos indicam que a configuração inclinada apresenta menor dispersão quando comparada à horizontal.

A Figura 6.12 apresenta os resultados obtidos para o comprimento do pistão de líquido plotados em função da velocidade da mistura. Nesta figura pode-se verificar com mais clareza a maior dispersão dos dados de comprimento de pistão de líquido para o caso horizontal mencionado anteriormente.

Tabela 6.12 – Comprimento médio e desvio padrão do comprimento do pistão de líquido para escoamento horizontal

Teste Horizontal	U_{Ls} (m/s)	U_{Gs} (m/s)	U_m (m/s)	L_s (m)	L_s / D	Desvio Padrão (m)
1	0.3	0.5	0.8	0.46	19.0	0.23
2	0.4	0.5	0.9	0.35	14.7	0.13
3	0.5	0.5	1.0	0.31	12.9	0.11
4	0.3	0.8	1.1	0.47	19.4	0.24
5	0.4	0.8	1.2	0.39	16.2	0.20
6	0.5	0.8	1.3	0.38	15.7	0.24

Tabela 6.13 – Comprimento médio e desvio padrão do comprimento do pistão de líquido para escoamento inclinado a 5°.

Teste Inclinado	U_{Ls} (m/s)	U_{Gs} (m/s)	U_m (m/s)	L_s (m)	L_s / D	Desvio Padrão (m)
1	0.3	0.5	0.8	0.37	15.5	0.13
2	0.4	0.5	0.9	0.36	15.1	0.12
3	0.5	0.5	1.0	0.34	14.3	0.13
4	0.3	0.8	1.1	0.36	15.1	0.12
5	0.4	0.8	1.2	0.35	14.8	0.11
6	0.5	0.8	1.3	0.40	16.6	0.25

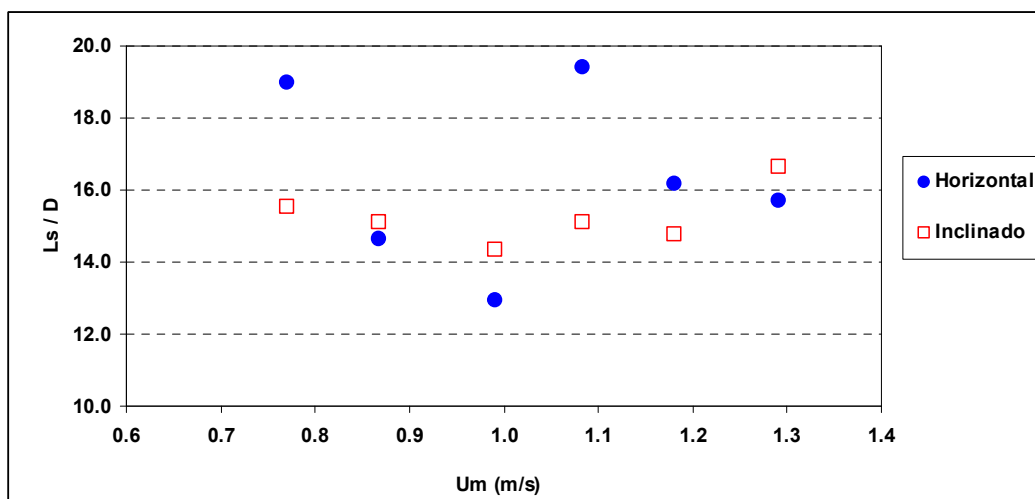


Figura 6.12 – Comportamento do comprimento do pistão de líquido para o escoamento horizontal e inclinado.

A Tabela 6.14 a seguir apresenta dados encontrados na literatura para comprimentos médios de pistão de líquido com diferentes diâmetros e ângulos da tubulação. Pode-se observar que os valores obtidos no presente trabalho estão de acordo com os resultados da literatura.

Tabela 6.14 – Resultados para comprimento médio do pistão de líquido encontrados na literatura.

Autor	Diâmetro	Escoamento	Ls (médio)
Nydal et al (1992)	50 mm	Horizontal	15D ~ 20D
	90 mm	Horizontal	12D ~ 16D
van Hout et al (2003)	24 mm	10, 30 e 90 graus	11,6D, 19,5D e 16,3D
	54 mm	10, 30 e 90 graus	8,6D, 12,5D e 20,7D
Cook & Behnia (2000)	50 mm	5 graus	11D ~ 13D
Duarte (2007)	26 mm	Horizontal	12,7D ~ 18,2 D

As distribuições de probabilidade dos resultados de comprimento de pistão de líquido são apresentadas nas Figuras 6.13 e 6.14.

Nota-se nas figuras que as distribuições de probabilidade para o caso inclinado tendem a ser mais simétricas que aquelas para o caso horizontal, além de apresentarem menor dispersão, como já mencionado.

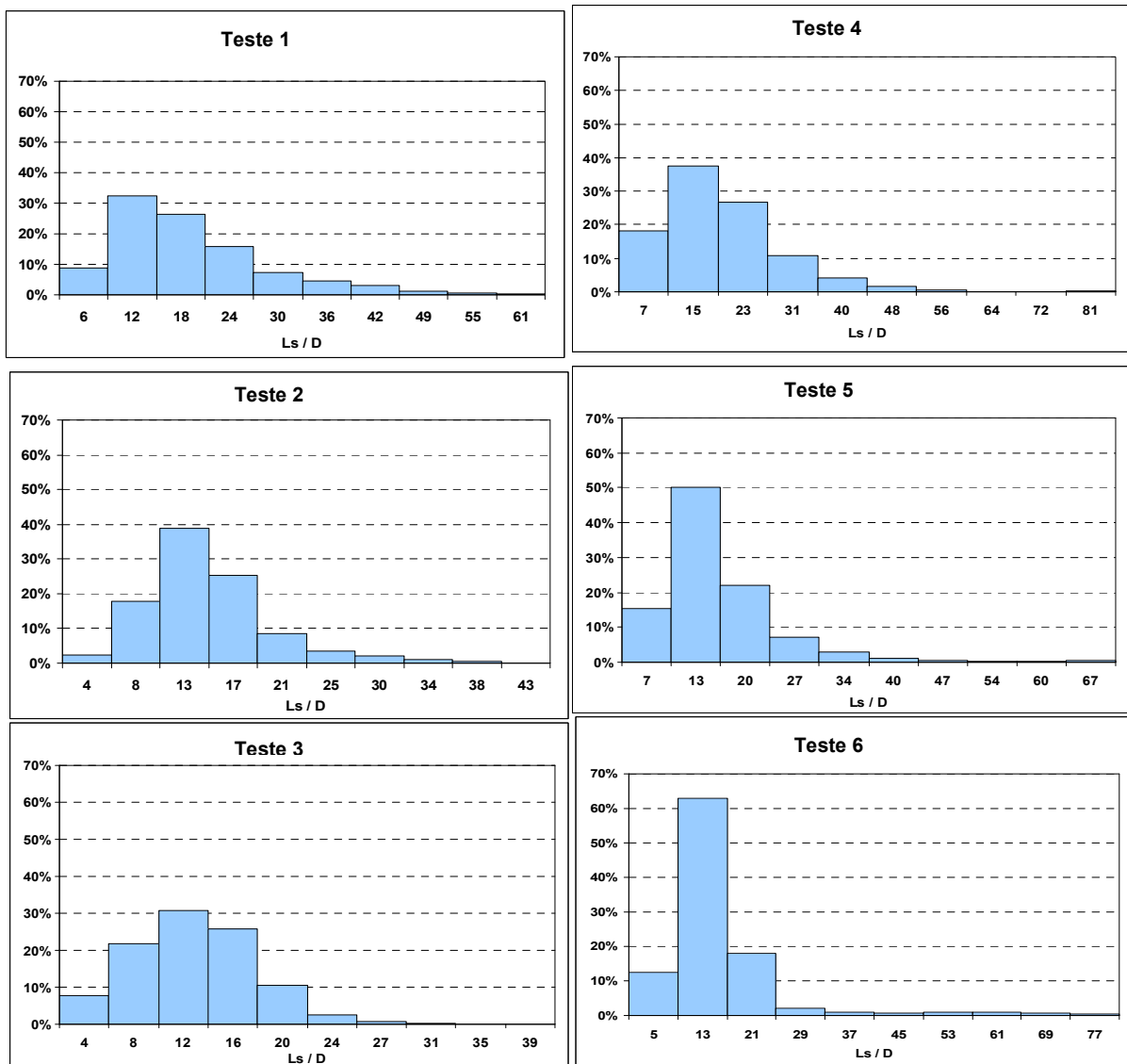


Figura 6.13 – Distribuição de probabilidade de comprimentos do pistão para escoamento horizontal.

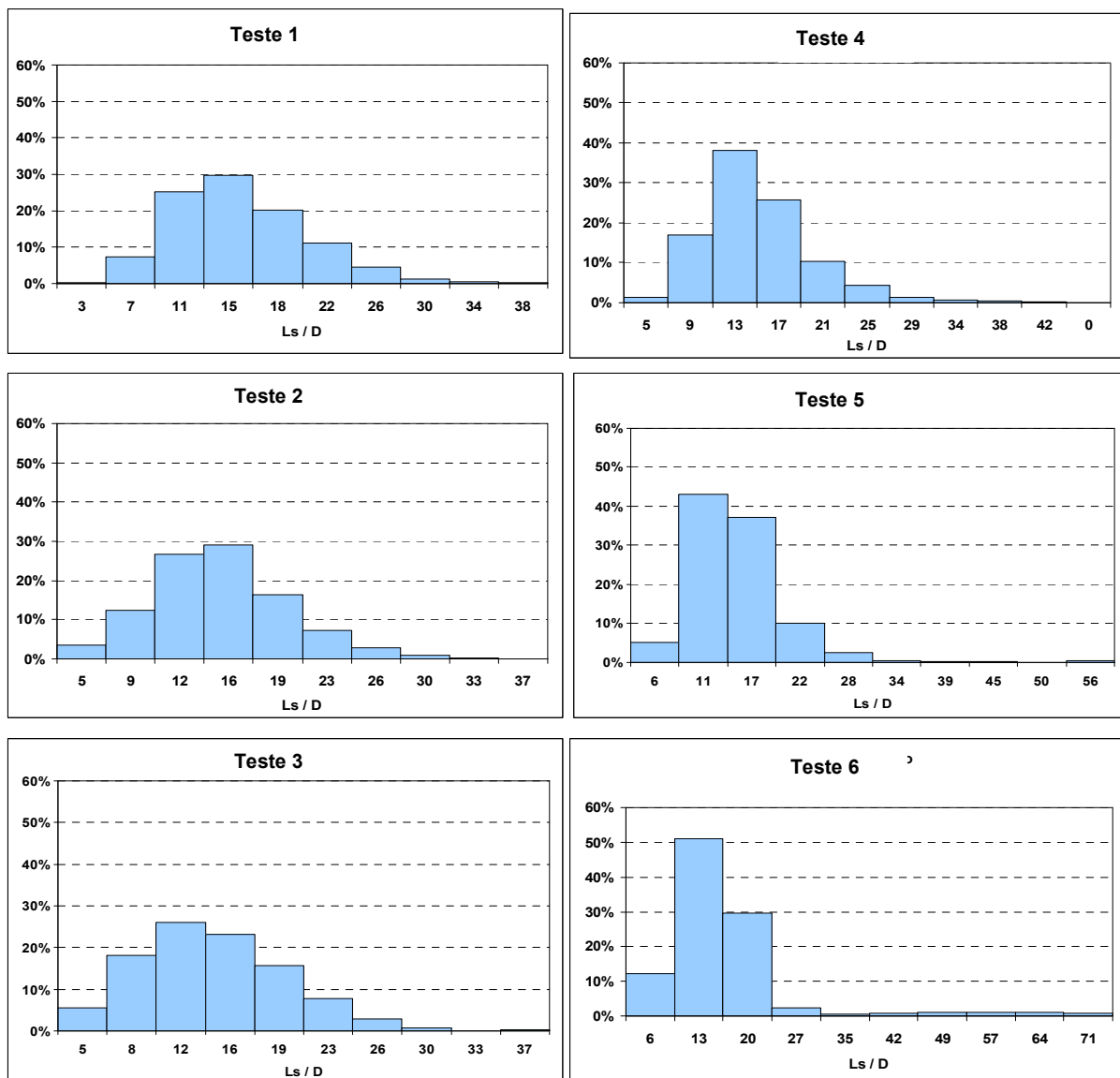


Figura 6.14 – Distribuição de probabilidade para comprimentos do pistão para escoamento inclinado a 5o.

Os dados apresentados nesta seção podem ser utilizados para determinar o grau de correlação entre o comprimento do pistão de líquido, L_s , e a velocidade da bolha de gás, u_t . Para este fim, foi calculado o coeficiente de correlação entre estas variáveis definido como,

$$R(x, y) = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad \text{Eq. (6.1)}$$

Onde a covariância das duas variáveis é dada por,

$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \quad \text{Eq. (6.2)}$$

Nas equações acima, x e y representam o comprimento do pistão, L_s , e a velocidade da bolha, u_t , respectivamente. A média e desvio padrão destas variáveis são representados por μ e σ .

O coeficiente de correlação tal como definido pela equação 6.1 assume valores entre -1 e +1, significando, respectivamente, máxima correlação negativa e positiva. Valores nulos ou próximos de zero, indicam falta de correlação entre as variáveis.

A Tabela 6.15 apresenta os valores calculados para o coeficiente de correlação $R(L_s, u_t)$ entre o comprimento do pistão de líquido, L_s , e a velocidade de deslocamento da bolha, u_t .

Tabela 6.15 – Coeficiente de correlação entre o comprimento do pistão e líquido e a velocidade da bolha.

Teste	R (L_s, u_t)	
	Horizontal	Inclinado
1	-0.218	0.026
2	-0.036	0.061
3	0.001	0.024
4	-0.074	0.029
5	-0.038	0.074
6	0.054	0.038

Como pode ser observado na tabela anterior, os valores de R se apresentam próximo à zero, indicando uma independência estatística entre estas variáveis. Esta independência pode ser explicada pelo fato que os pistões de líquido, em geral, apresentam um perfil de velocidade desenvolvido em suas caudas. Assim, as bolhas que seguem um dado pistão encontram condições hidrodinâmicas ditadas por um perfil de velocidade desenvolvido no pistão de líquido, independentemente do comprimento do pistão de líquido que a precede. Esta independência entre velocidade da bolha e comprimento de pistão de líquido também é citada no trabalho de Nydal et al (1992).

6.3.5. Frequência dos *slugs*.

As frequências de passagem dos *slugs*, determinadas pelos procedimentos descritos na seção 5.6.4, são apresentadas na Figura 6.15. Na figura, a frequência em Hz é apresentada em função da velocidade superficial do líquido, u_{Ls} , para dois valores da velocidade superficial do gás, u_{gs} , tanto no escoamento horizontal quanto no inclinado.

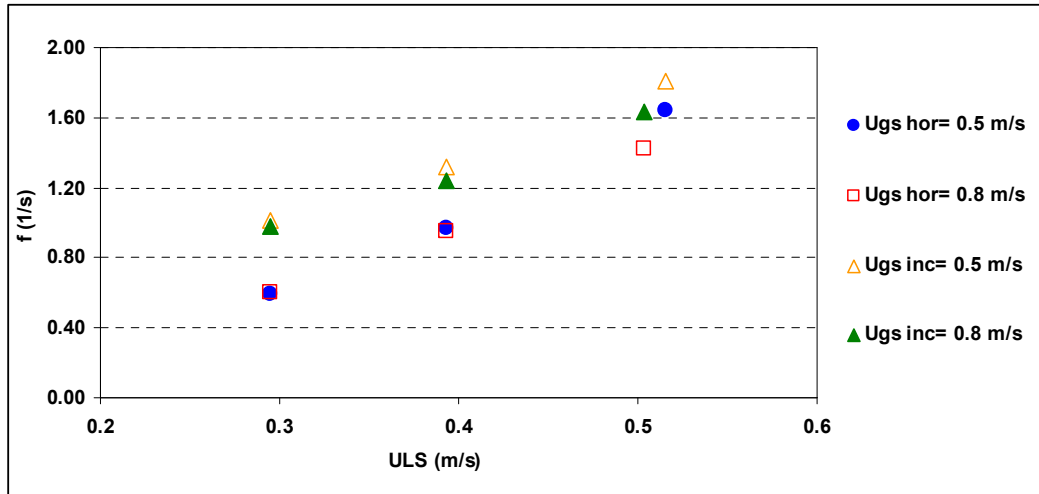


Figura 6.15 – Comparação entre a frequência de passagem e a velocidade superficial de líquido.

Pode-se observar uma dependência aproximadamente linear da frequência com a velocidade da fase líquida, tanto para escoamento horizontal quanto para o inclinado.

Na Figura 6.16, os resultados obtidos no presente trabalho são comparados com os resultados obtidos para escoamento horizontal por Duarte (2007). Os gráficos da frequência média da célula (*slug*) versus a velocidade superficial do gás são apresentados para os valores da velocidade superficial do líquido indicados na figura.

Observa-se uma boa concordância entre os resultados do presente trabalho e os resultados de Duarte (2007) para a velocidade da fase líquida igual a 0,3 m/s, velocidade investigada pelos dois trabalhos. Para outros valores da velocidade da fase líquida, os dois trabalhos apresentam resultados coerentes, apesar de não terem investigados os mesmos valores da velocidade de líquido.

A partir dos resultados de ambos os trabalhos pode-se observar que, para baixas velocidades de líquido (0,3 a 0,4 m/s), a frequência média apresentou valores aproximadamente constantes. A partir do aumento da velocidade da fase líquida, a frequência passou a diminuir com o aumento da velocidade superficial de gás.

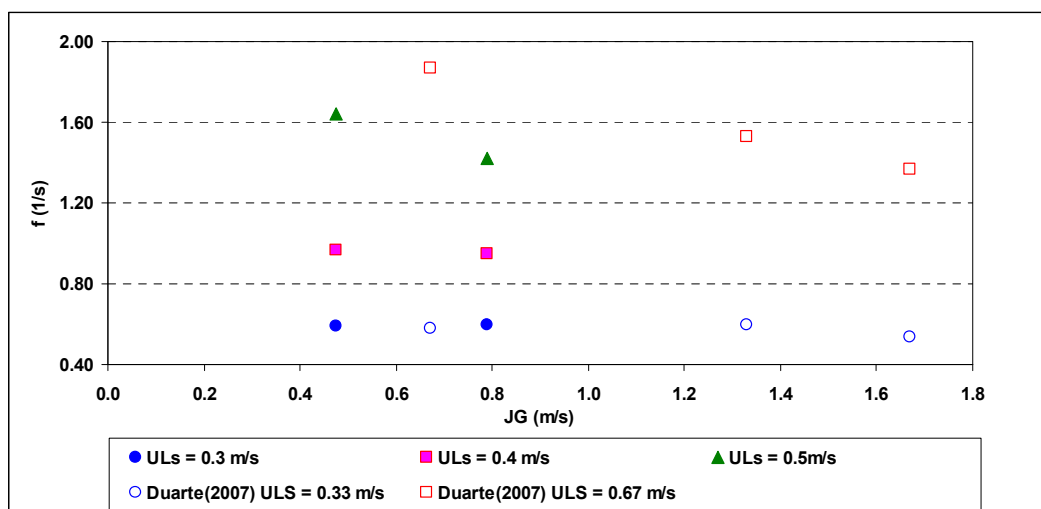


Figura 6.16 – Comparação dos resultados para frequência de passagem de *slugs* com os resultados de Duarte (2007) para tubo horizontal.

Os resultados obtidos no presente trabalho foram comparados com algumas correlações desenvolvidas para avaliação da frequência de passagem de *slugs* disponíveis na literatura e já apresentadas na seção 2.1.6. A Tabela 6.16 apresenta esta comparação para o caso de escoamento horizontal.

Tabela 6.16 - Comparação com valores de correlações da literatura para escoamento horizontal.

Teste Horizontal	U_{LS} (m/s)	U_{GS} (m/s)	U_m (m/s)	Freq.média presente trabalho (Hz)	Greskovich and Shrier 1972 (Hz)	Heywood and Richardson 1979 (Hz)
1	0.3	0.5	0.8	0.59	1.51	1.51
2	0.4	0.5	0.9	0.97	1.86	1.79
3	0.5	0.5	1.0	1.64	2.23	2.08
4	0.3	0.8	1.1	0.60	1.04	1.06
5	0.4	0.8	1.2	0.95	1.34	1.31
6	0.5	0.8	1.3	1.42	1.64	1.55

Os resultados da Tabela 6.16 indicam, na comparação com as correlações selecionadas na literatura, um nível de concordância que melhora à medida que a velocidade da mistura aumenta. Nota-se também que esta concordância apresenta maior dependência com a vazão de líquido. Tal fato pode estar associado às altas velocidades que os trabalhos utilizaram.

Nos trabalhos experimentais citados na Tabela 6.16 e adotados para comparação com o presente trabalho, pode ser visto pelas equações 2.14 e 2.15 que a dependência em relação à vazão de líquido também é observada.

6.4.

Resultados de campos de velocidade na fase líquida

Nesta seção serão apresentados os resultados dos campos de velocidade instantâneos e médios obtidos para a fase líquida na vizinhança da bolha de gás, medidos pelas técnicas *PIV*, *LIF* e *PST*, implementadas e descritas nos Capítulos 3 e 4. A metodologia experimental desenvolvida e empregada nos estudos permitiu a obtenção de resultados detalhados dos campos de velocidade instantâneos e médios nas regiões à montante do nariz da bolha, a jusante de sua cauda e na região do filme de líquido sob a bolha. Também foram obtidos resultados sobre grandezas turbulentas do escoamento nestas regiões.

Como poderá ser observado nas seções seguintes, a riqueza de informações proporcionada pelas técnicas ópticas implementadas é muito grande. Devido a limitações de tempo inerentes a um trabalho de dissertação de mestrado, a análise física dos resultados obtidos é apresentada de maneira breve, tendo em vista que o foco principal do trabalho foi a implementação, teste e levantamento dos dados dos campos instantâneos de velocidade. A análise mais aprofundada dos dados buscando um melhor entendimento dos fenômenos

hidrodinâmicos envolvidos, sua comparação com previsões numéricas disponíveis e a proposição de novas correlações, é parte de trabalho de pesquisa em andamento ao qual o presente trabalho está vinculado.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os campos de velocidade na vizinhança da bolha.

6.4.1.

Velocidades instantâneas no referencial do laboratório

Nesta seção serão apresentados os resultados relativos à medição dos campos instantâneos de velocidade, tanto da região situada à montante da bolha quanto à jusante de sua cauda. Devido ao fato da câmera digital que capturou as imagens ser fixa, os resultados a serem apresentados para o campo de velocidade são relativos a um referencial fixo ao laboratório e a escala de cores é representada pelo módulo do vetor velocidade. Em uma seção posterior serão apresentados resultados para os campos de velocidade relativos à bolha que se move.

6.4.1.1.

Região do nariz da bolha

A Figura 6.17 apresenta os resultados para os campos de velocidade instantâneos para escoamento horizontal na região a montante do nariz da bolha, enquanto que a figura 6.18 mostra os campos de velocidade para o escoamento inclinado a 5° . Para facilitar a visualização dos resultados, a quantidade original de vetores obtida após o processamento pelo software (aproximadamente 7500 vetores) foi reduzida pela metade, sendo referenciados à escala de cores na parte direita da figura.

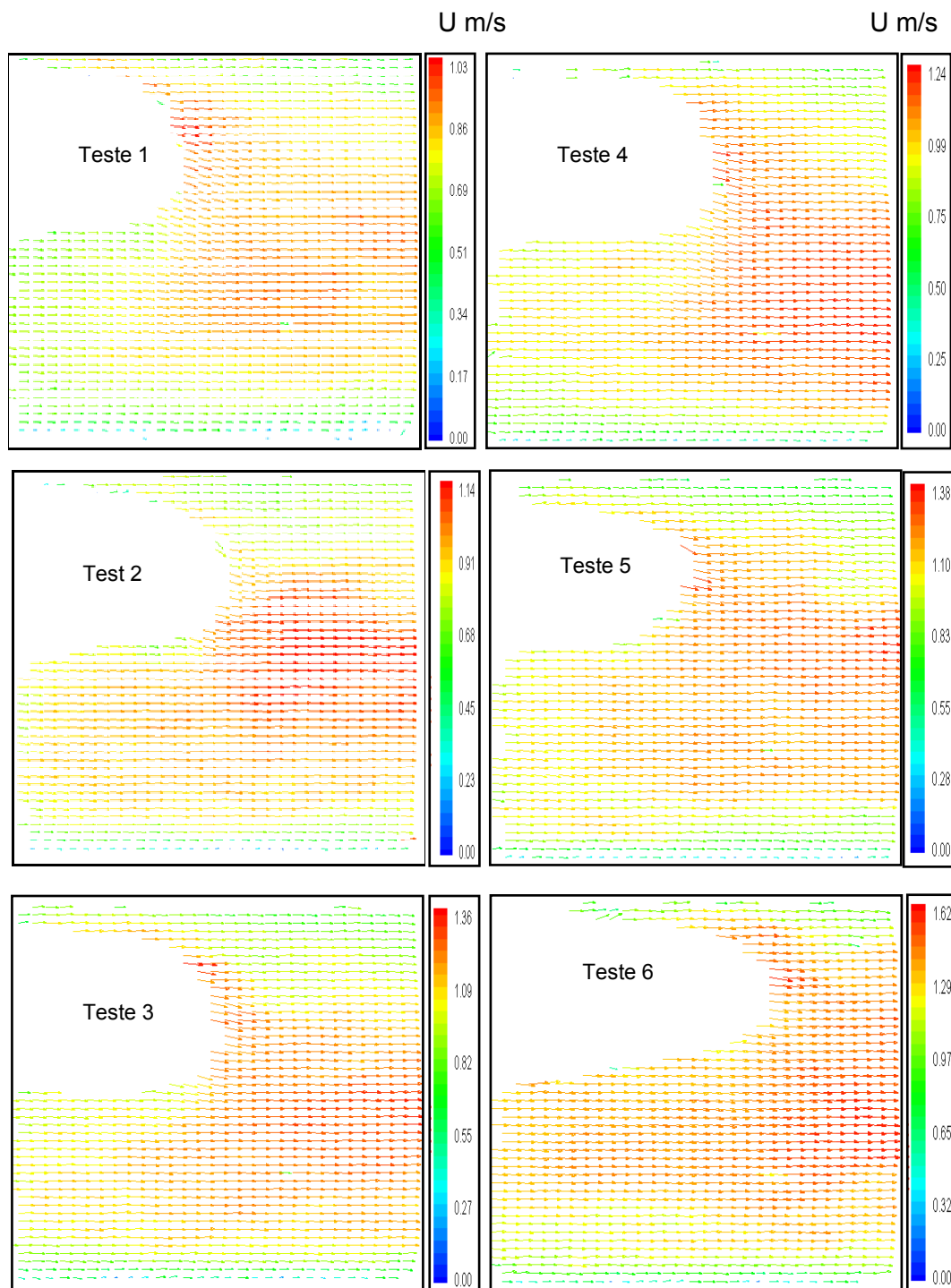


Figura 6.17 – Campo instantâneo de velocidade de líquido na região do nariz da bolha para escoamento horizontal. Escala de cores representa o módulo da velocidade.

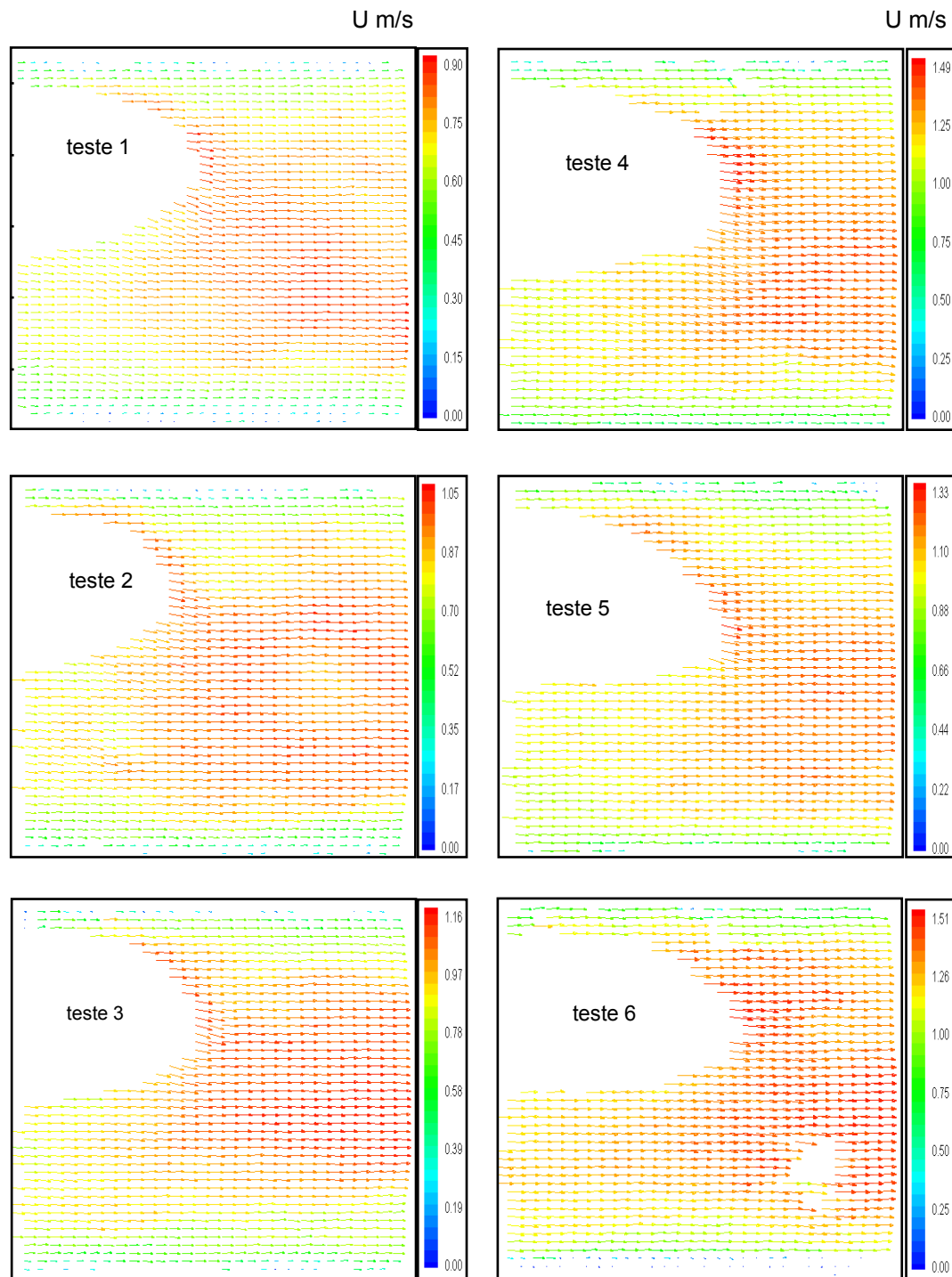


Figura 6.18 – Campo instantâneo de velocidade de líquido na região do nariz da bolha para escoamento inclinado. Escala de cores representa o módulo da velocidade.

Uma análise global da Figura 6.17 mostra o escoamento sempre se movendo na direção positiva no referencial do laboratório, com uma zona de velocidade máxima (vetores vermelhos na figura) próxima ao ponto mais pronunciado do nariz da bolha e outra próxima à linha de centro do tubo, à frente da posição da bolha de gás.

Uma observação conjunta dos testes 1, 2 e 3 apresentados na Figura 6.17 oferece uma indicação da influência sobre o campo de escoamento e forma da bolha do aumento da velocidade superficial do líquido para uma velocidade superficial de gás constante e de baixo valor. Como pode ser observado, à medida que a velocidade de líquido aumenta, a região de velocidade mais alta (região vermelha) tende a ocupar uma maior porção do tubo, indicando a formação de um escoamento com perfil de velocidade plano (*plug flow*). Nota-se também o início de uma tendência da bolha mover-se para o centro do tubo.

O efeito da inclinação do tubo a 5° com a horizontal pode ser observado pela comparação dos resultados das Figuras 6.18 e 6.17. Pode-se notar que a bolha encontra-se comparativamente mais afastada da parede superior do tubo, provavelmente como resultado da diminuição da componente da força de empuxo na direção radial decorrente da inclinação do tubo. Nota-se também que as zonas de maior velocidade (zonas vermelhas) encontram-se na metade superior do tubo, situando-se comparativamente mais acima do que no caso horizontal.

Voltando-se ao caso horizontal, o efeito do aumento da velocidade superficial de gás pode ser observado avaliando os testes 4, 5 e 6. Pode-se notar que para as baixas velocidades de líquido (teste 4) há uma significativa variação na forma da bolha de gás que, comparativamente ao caso do teste 1 com menor velocidade de gás, apresentava-se mais afastada da parede superior e com a posição do nariz movendo-se em direção ao centro do tubo. O movimento do nariz da bolha para o centro do tubo e a mudança da forma mais arredondada para uma forma mais alongada já foram reportados na literatura, como por exemplo, no trabalho de Bendiksen (1984).

O efeito da inclinação do tubo para as maiores velocidades superficiais de gás é observado nos testes 4, 5 e 6 da Figura 6.18. Da mesma forma como já comentado para os casos de menor vazão, a inclinação do tubo acentua o alongamento da bolha e o movimento do nariz para o centro do tubo. A se notar também a presença de pequenas bolhas de gás dispersas no pistão de líquido a montante da bolha para os casos onde há inclinação do tubo e maiores velocidades de gás. A presença destas pequenas bolhas impede que a técnica

PIV determine vetores velocidade nestas regiões que aparecem como regiões vazias no campo de velocidade de líquido. Caso o número de bolhas dispersas cresça em excesso, a aplicação das técnicas ópticas implementadas no presente trabalho fica severamente limitada.

6.4.1.2.

Região da esteira da bolha

A seguir são apresentados os resultados de campos instantâneos de velocidade referentes à região da esteira da bolha. A Figura 6.19 refere-se aos resultados para escoamento horizontal, enquanto que a Figura 6.20 apresenta os resultados para o tubo inclinado.

Os resultados para a menor velocidade superficial de gás investigada apresentados nos testes 1, 2 e 3 para a configuração horizontal mostram uma forma de cauda de bolha íntegra, apresentando uma fronteira bem definida e de forma alongada, como reportado por *Fagundes Netto 1999* para estes baixos valores do número de Froude.

Analisando o caso da menor velocidade superficial de líquido (teste 1), o campo de velocidade mostra uma região de velocidade elevada (região vermelha) junto à parede superior do tubo, a montante da cauda da bolha. Abaixo desta região e até a parede inferior do tubo, há regiões com magnitudes de velocidade significativamente menores. À medida que a velocidade superficial de líquido aumenta (testes 2 e 3, a intensidade da velocidade máxima na parte superior do tubo diminui, mas, em contrapartida, verifica-se um avanço da região de velocidades mais elevadas na direção da parede inferior do tubo, indicando uma maior uniformidade no perfil radial de velocidade axial. Deve-se mencionar que para estas três figuras, a velocidade do líquido é sempre no mesmo sentido do deslocamento da bolha.

O efeito marcante do aumento da velocidade de gás sobre a estrutura do escoamento na esteira da bolha pode ser observado para os testes 4, 5 e 6 da mesma figura. Nota-se que a cauda da bolha toma uma forma menos suave e que a região do pistão de líquido encontra-se fortemente afetada pela presença de pequenas bolhas dispersas que promovem mistura e maior homogeneização do campo de velocidade. Este efeito também foi reportado por *Fagundes Netto (1999)* para maiores valores do número de *Froude*.

Os efeitos da inclinação do tubo podem ser avaliados pela comparação entre os testes 1, 2 e 3 nas Figuras 6.19 e 6.20 e, para uma maior velocidade superficial de gás, pela comparação dos testes 4, 5 e 6 para as mesmas Figuras.

A característica mais relevante desta comparação é a forte presença de bolhas dispersas na cauda da bolha de gás para o escoamento inclinado.

A agitação promovida pela presença das bolhas na esteira produz impactos nos campos de velocidade instantâneos. A Figura 6.21 apresenta um campo de velocidade instantâneo obtido para o escoamento inclinado nas condições do Teste 5. Na Figura, foi incluída uma vista ampliada da região do escoamento na esteira da bolha, junto à parede inferior do tubo. Pode-se notar a presença de escoamento recirculante e de inúmeros vórtices induzidos pela presença das bolhas dispersas.

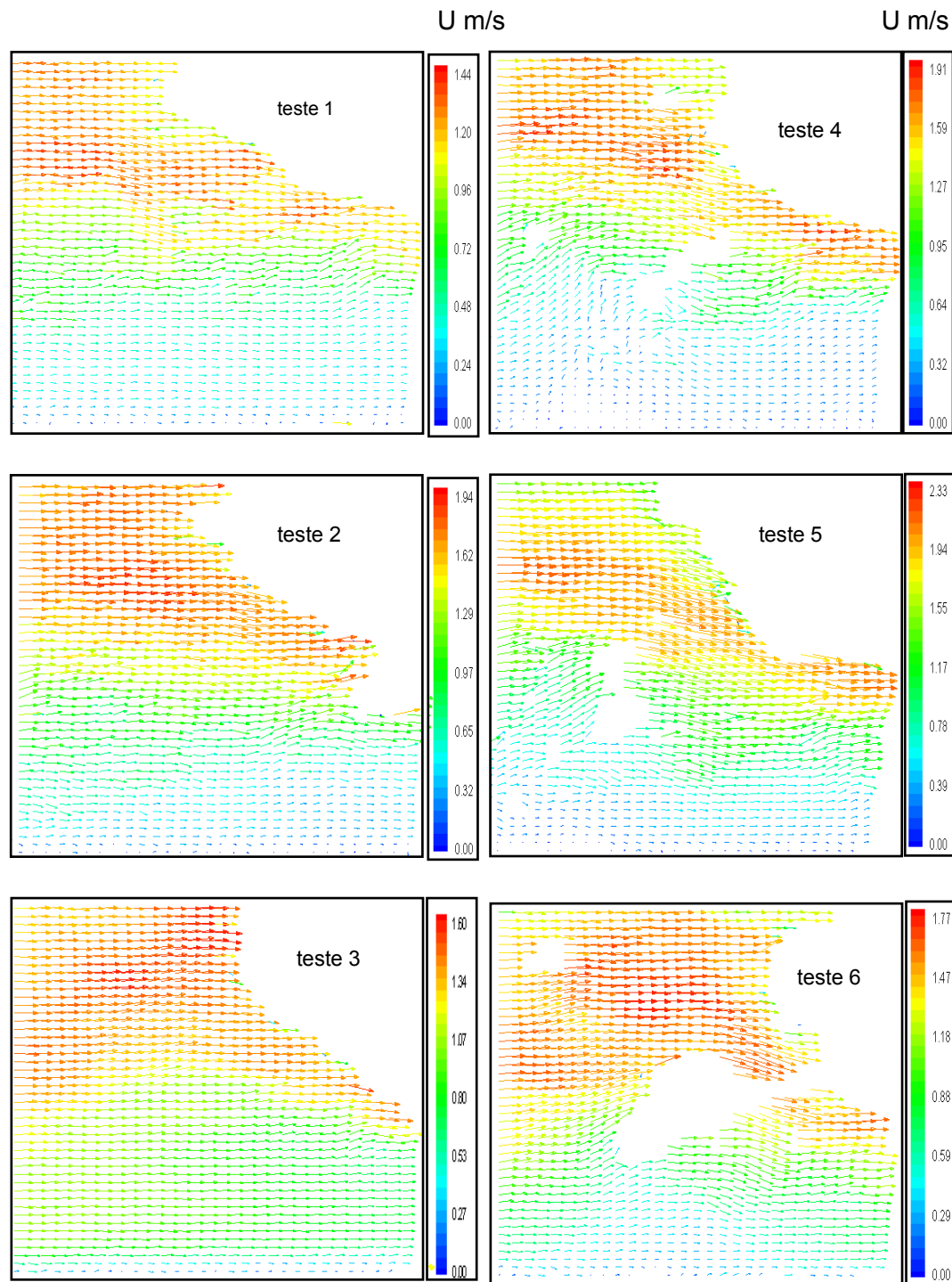


Figura 6.19 – Campo instantâneo de velocidade de líquido na região da cauda da bolha para escoamento horizontal. Escala de cores representa o módulo da velocidade.

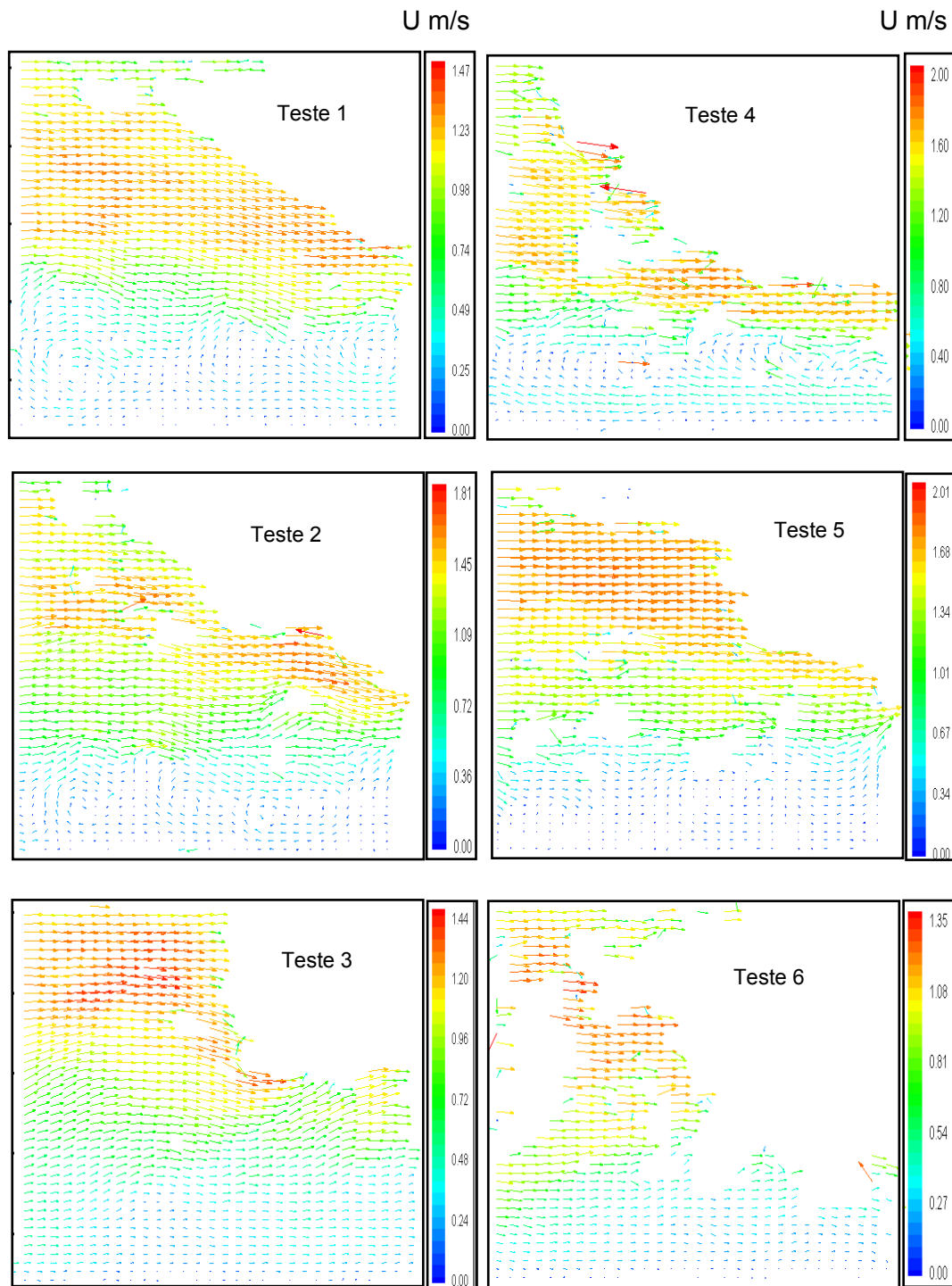


Figura 6.20 – Campo instantâneo de velocidade de líquido na região da cauda da bolha para escoamento inclinado. Escala de cores representa o módulo da velocidade.

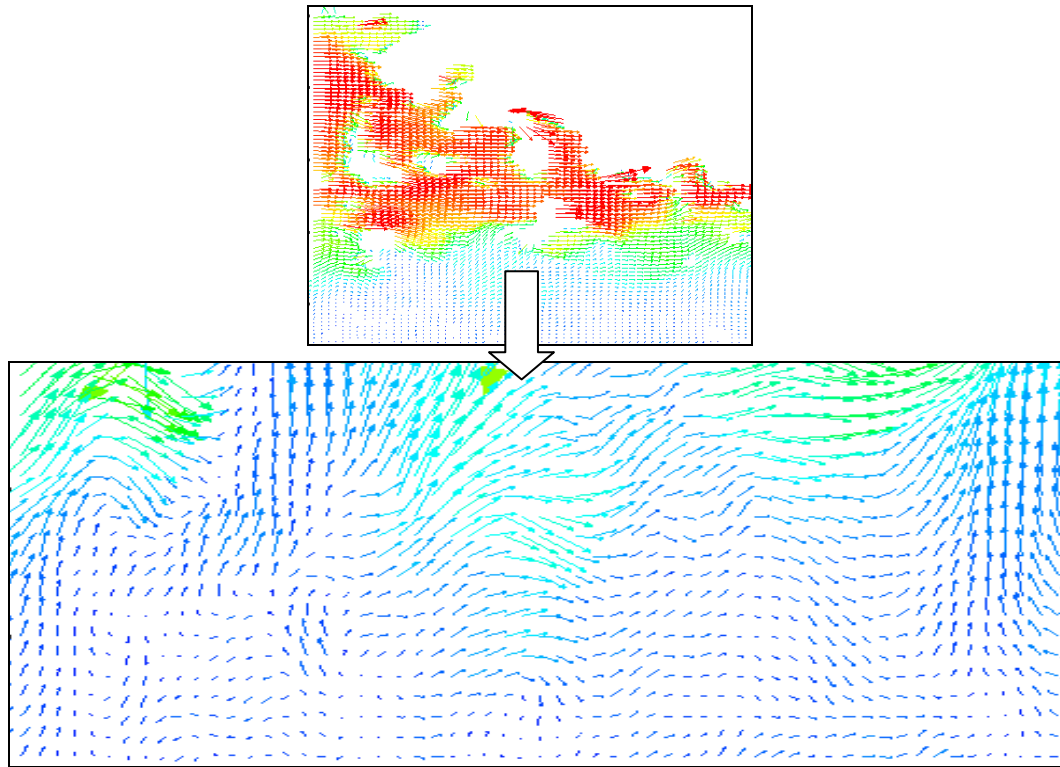


Figura 6.21 – Teste 5, escoamento inclinado. Ampliação da região inferior do tubo mostrando zona de recirculação do escoamento.

6.4.2. Campo instantâneo de velocidade no referencial da bolha em movimento

A apresentação dos campos de velocidade instantâneos obtidos no referencial da bolha em movimento oferece novas visões sobre o escoamento nas regiões à montante do nariz da bolha e à jusante de sua cauda.

Para esta apresentação, dos resultados obtidos para os campos de velocidade instantâneos medidos em relação ao referencial do laboratório e apresentados nas seções anteriores, foram subtraídas a velocidade da bolha, tomada como sendo a velocidade máxima na região do nariz medida pelo PIV, segundo a eq. 6.3.

$$u_x^*(x, y) = u_x(x, y) - u_t \quad \text{Eq. (6.3)}$$

Na Figura 6.22 são apresentados os resultados para o campo instantâneo de velocidade no referencial da bolha para escoamento horizontal. A Figura 6.23

apresenta os resultados dos mesmos testes para a configuração inclinada. Para ambos os casos, utilizou-se linhas de correntes para facilitar a visualização dos resultados. Para estes casos, a escala de cores representa a velocidade na direção axial do escoamento (u_x^*).

A análise dos resultados para os Testes 1, 2 e 3, os quais são conduzidos com a mesma velocidade superficial de gás (0,5 m/s) indica que a velocidade da bolha é sempre superior à velocidade do escoamento de líquido, o que produz campos de velocidade que apresentam velocidades sempre negativas no referencial da bolha. Nota-se que a região a montante do nariz da bolha é uma região praticamente estagnada. O escoamento se dá predominantemente do canto superior direito para o canto inferior esquerdo da figura, contornando o nariz da bolha e penetrando na região do filme sob a bolha, região onde ocorrem os maiores valores absolutos da velocidade.

Analizando os testes 4, 5 e 6, os quais apresentam velocidade de gás superior, observa-se que o escoamento predominante continua, como no caso da menor velocidade de gás, em diagonal do canto superior direito para o inferior esquerdo, penetrando no filme sob a bolha. Nota-se, de uma maneira geral, o surgimento de fracas zonas de escoamento recirculante a montante do nariz da bolha.

O efeito da inclinação do tubo pode ser avaliado pela análise da Figura 6.23. Na seção 6.3.1 do presente trabalho mostrou-se que a velocidade da bolha apresentava diminuição de valor com a inclinação do tubo. Nota-se que o deslocamento da bolha para o centro permite o escoamento entre a bolha e a parede superior do tubo. Para ambos os casos (horizontal e inclinado) pequenas regiões de recirculação a montante do nariz da bolha podem ser identificadas.

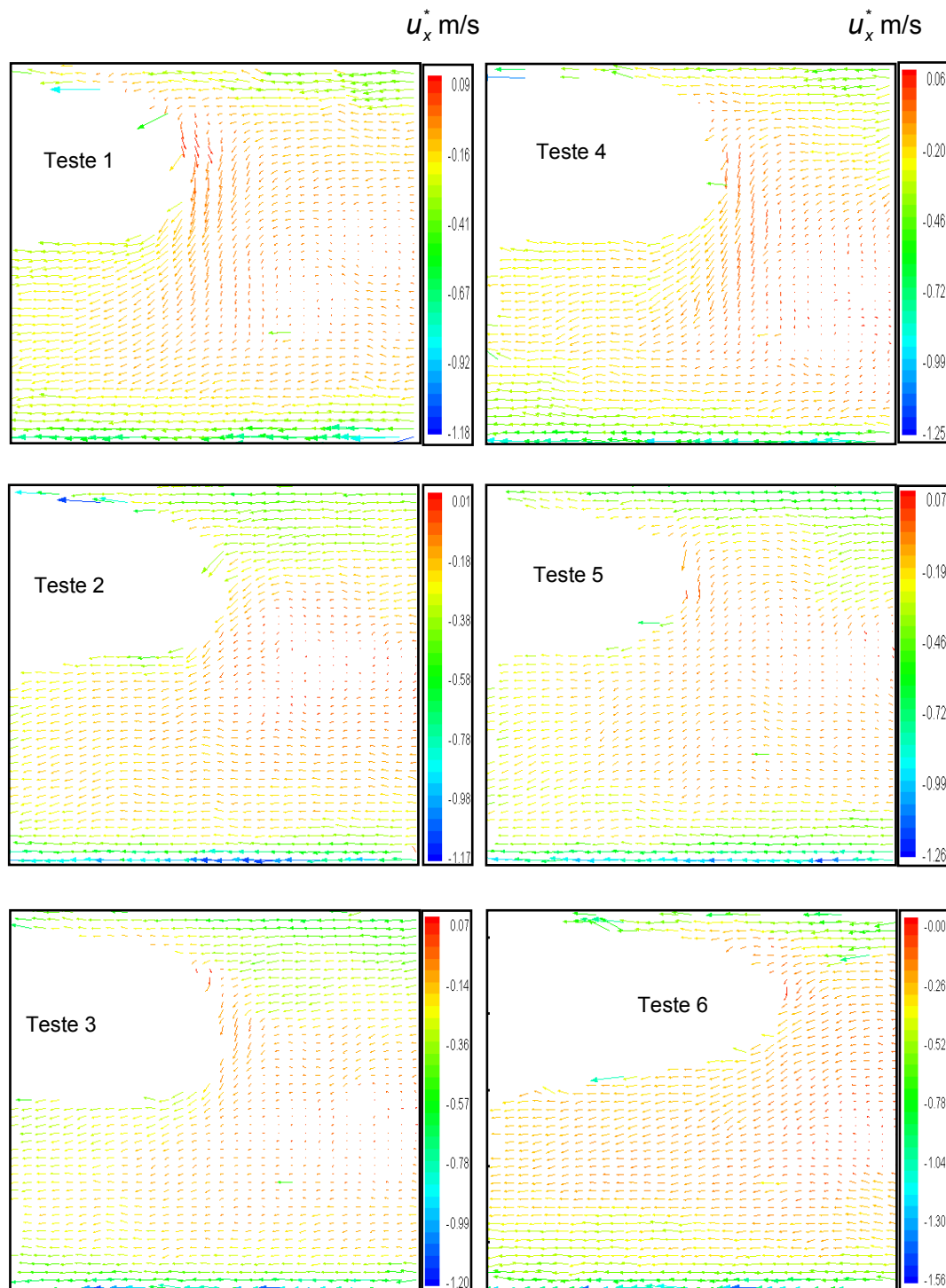


Figura 6.22 – Resultados para os campos instantâneos de velocidade do líquido na região do nariz da bolha, medidos em relação ao referencial da bolha para tubo horizontal. Escala de cores representa a velocidade na direção axial subtraída da velocidade da bolha.

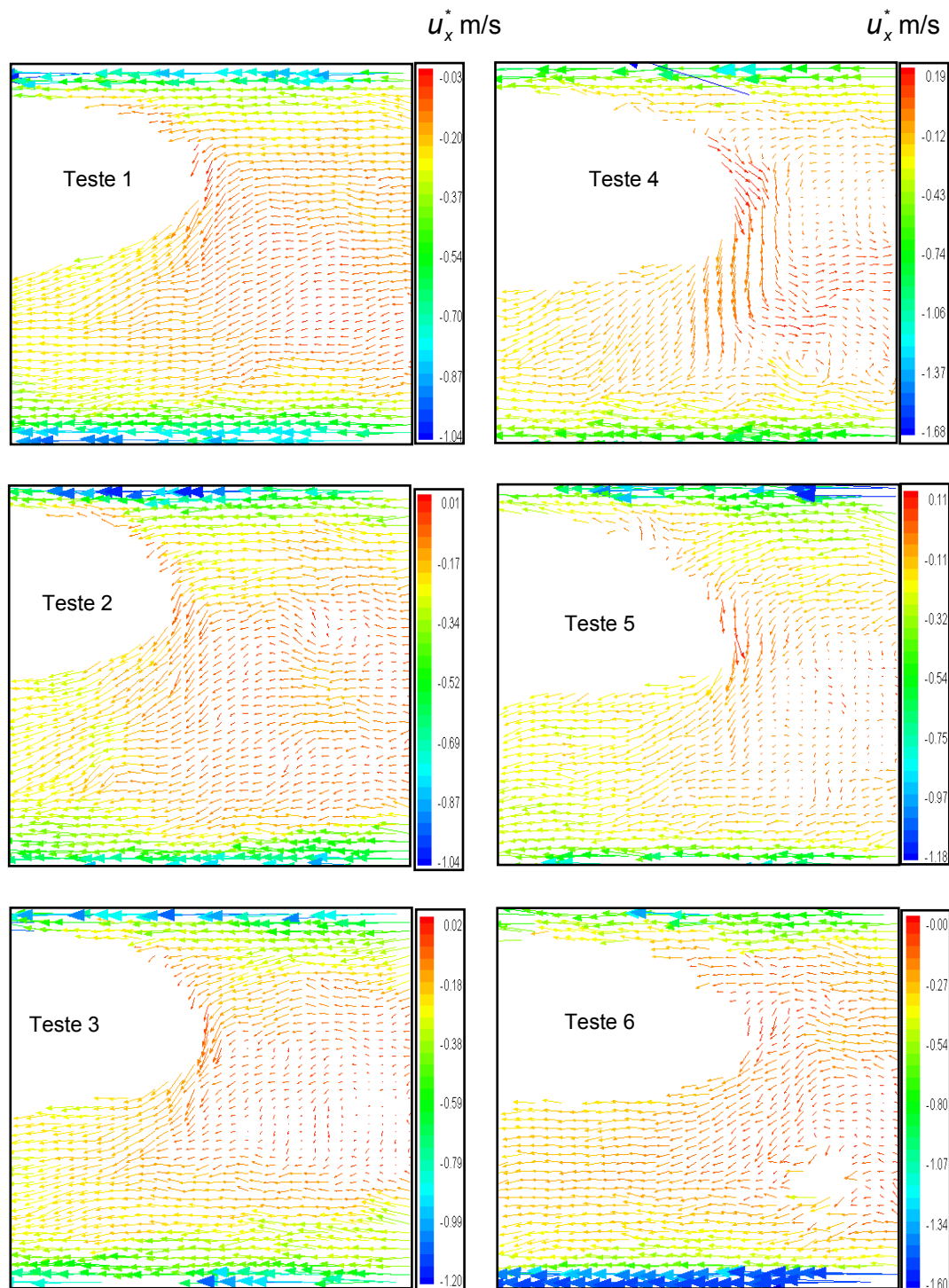


Figura 6.23 – Resultados para os campos instantâneos de velocidade do líquido na região do nariz da bolha, medidos em relação ao referencial da bolha para tubo inclinado. Escala de cores representa a velocidade na direção axial subtraída da velocidade da bolha.

A seguir são apresentados os resultados do escoamento na região da cauda da bolha medido em relação ao referencial da bolha.

Na Figura 6.24 são apresentados os resultados para a configuração horizontal onde podem ser observadas fortes recirculações causadas pelo escoamento que entra no domínio na região do filme, junto à parede inferior do tubo. No referencial da bolha, este escoamento se assemelha a uma expansão abrupta que é caracterizada pelas fortes recirculações identificadas na Figura.

O efeito da inclinação do tubo no escoamento na esteira da bolha é apresentado na Figura 6.25. A mudança de referencial permite observar detalhes do escoamento semelhantes àqueles descritos para o caso horizontal. A destacar, a presença de bolhas dispersas que produzem as regiões sem vetores velocidade.

A técnica de medição de campo instantâneo de velocidade empregada junto com a mudança de referencial permitiu observar, talvez pela primeira vez, a complexidade do escoamento na esteira da bolha de gás que ajudará a entender melhor os fenômenos hidrodinâmicos e de troca de calor e massa que ali ocorrem.

Uma análise paramétrica do escoamento nesta região não foi realizada no presente trabalho devido a limitações de tempo. Em todas as Figuras, foi possível observar a formação do jato de parede na saída da região do filme, induzindo uma grande recirculação que atua na traseira da bolha. Conforme poderá ser observado também nas respectivas figuras, o escoamento inclinado apresentou resultados ainda mais negativos na região próxima à parede que o escoamento horizontal, por conta da influência da gravidade discutida anteriormente.

Em todos os casos analisados para escoamento da região da cauda da bolha, é possível separar o escoamento em três regiões distintas.

Na parte superior, o líquido ainda move-se com uma velocidade superior à bolha e na porção inferior do tubo, a bolha move-se com velocidade acima do líquido. Na porção central do tubo, uma recirculação é observada por conta desta alteração do comportamento do líquido.

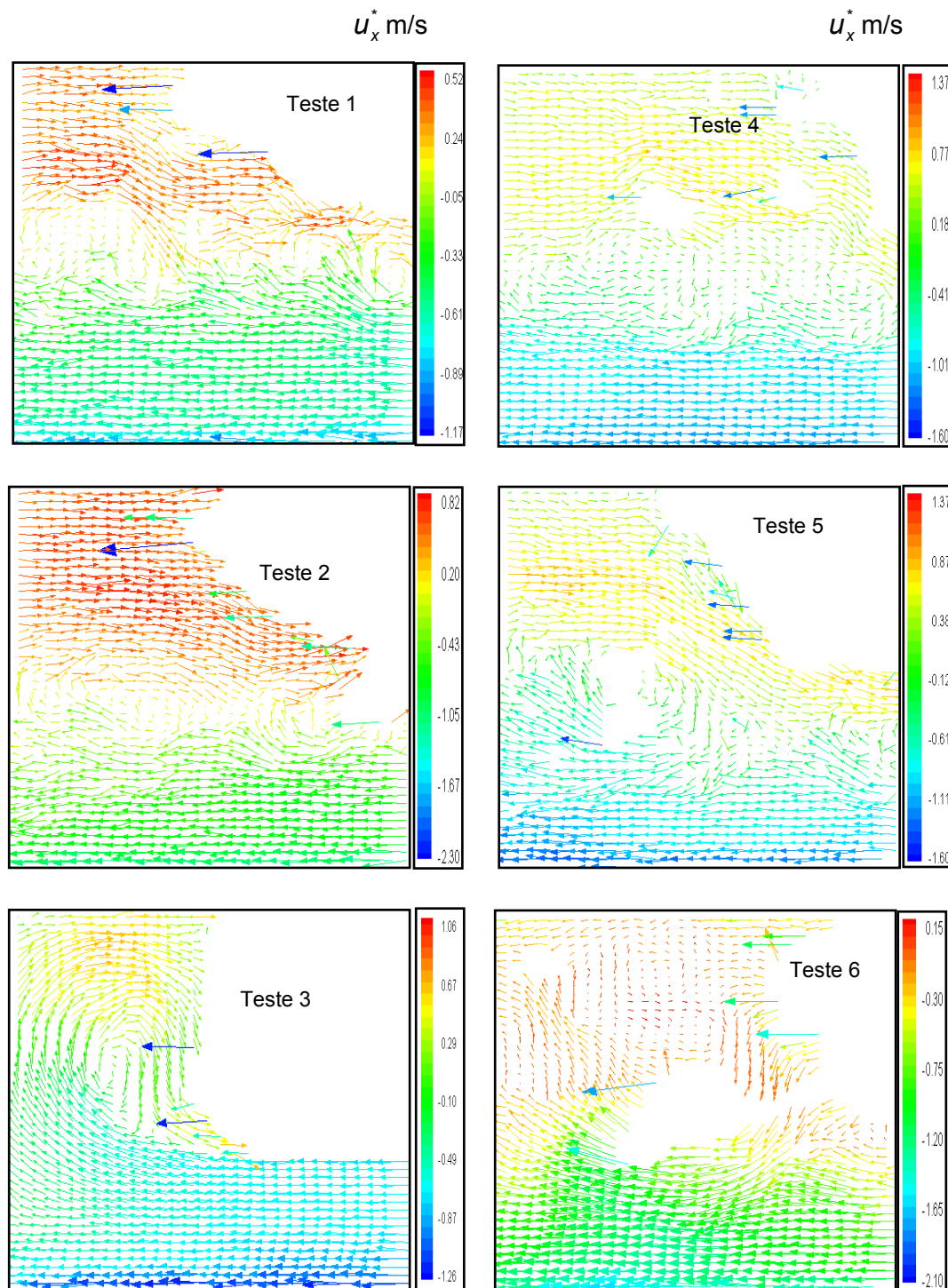


Figura 6.24 – Campo instantâneo de velocidade de líquido na região da cauda da bolha - esc. horizontal referencial em movimento. Escala de cores representa a velocidade na direção axial subtraída da velocidade da bolha.

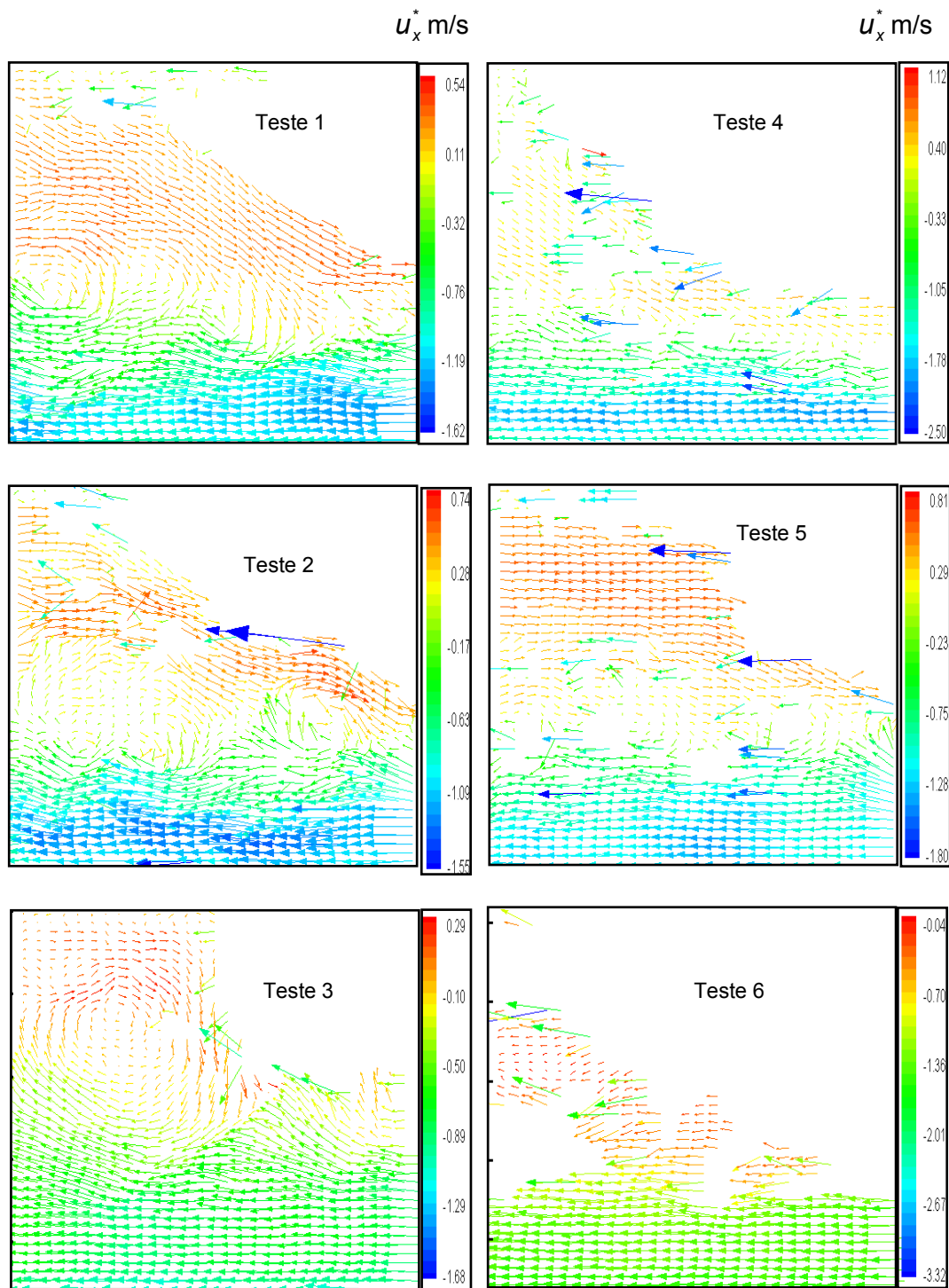


Figura 6.25 – Campo instantâneo de velocidade de líquido na região da cauda da bolha - esc. inclinado referencial em movimento. Escala de cores representa a velocidade na direção axial subtraída da velocidade da bolha.

Outra forma de apresentar os resultados referentes à mudança de referencial (Figura 6.22 a 6.25) pode ser a partir da utilização de linhas de corrente, conforme poderá ser visto a seguir da Figura 6.26 à 6.29.

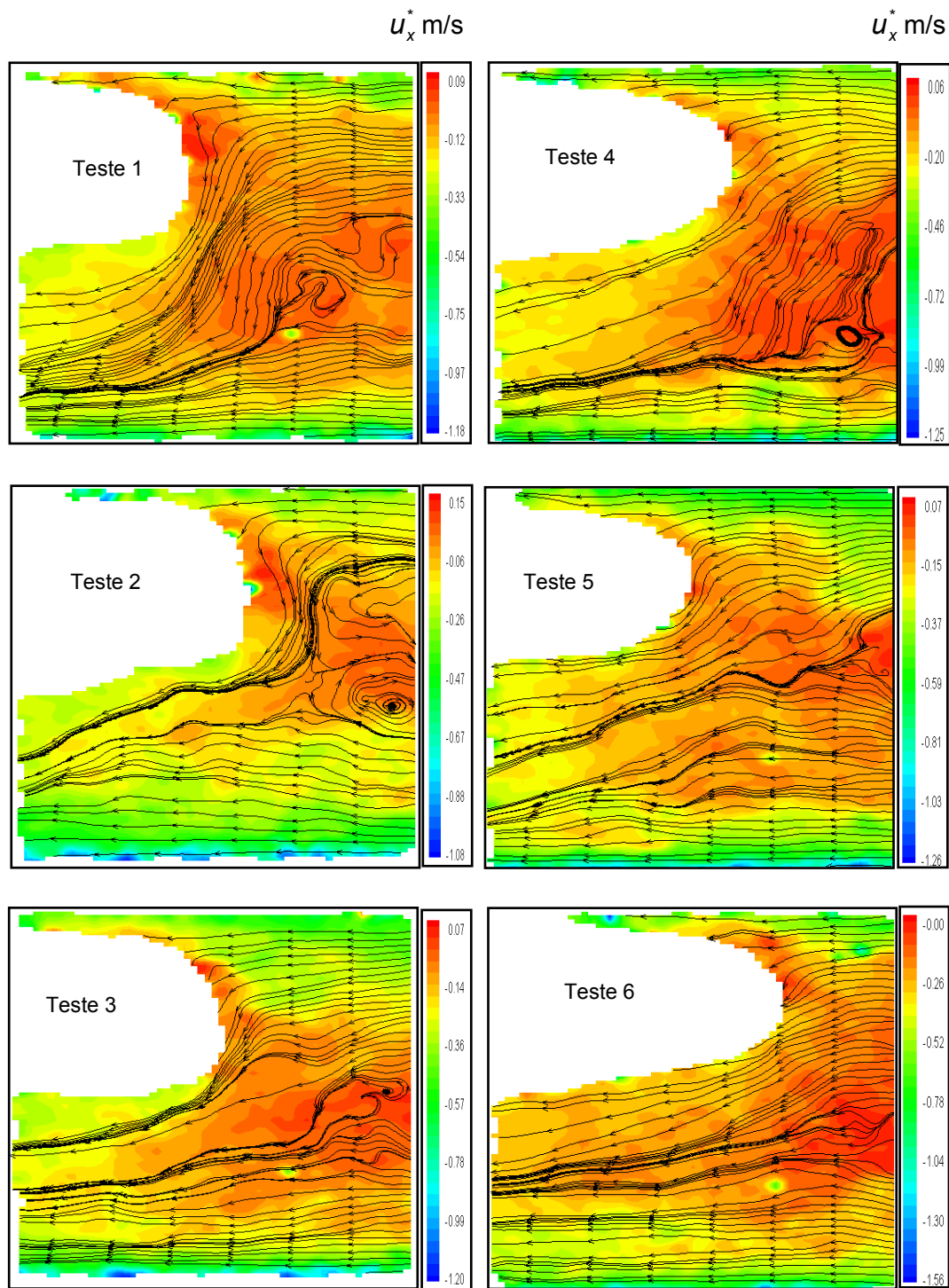


Figura 6.26 – Resultados para os campos instantâneos de velocidade do líquido na região do nariz da bolha, medidos em relação ao referencial da bolha para tubo horizontal. Escala de cores representa a velocidade na direção axial subtraída da velocidade da bolha.

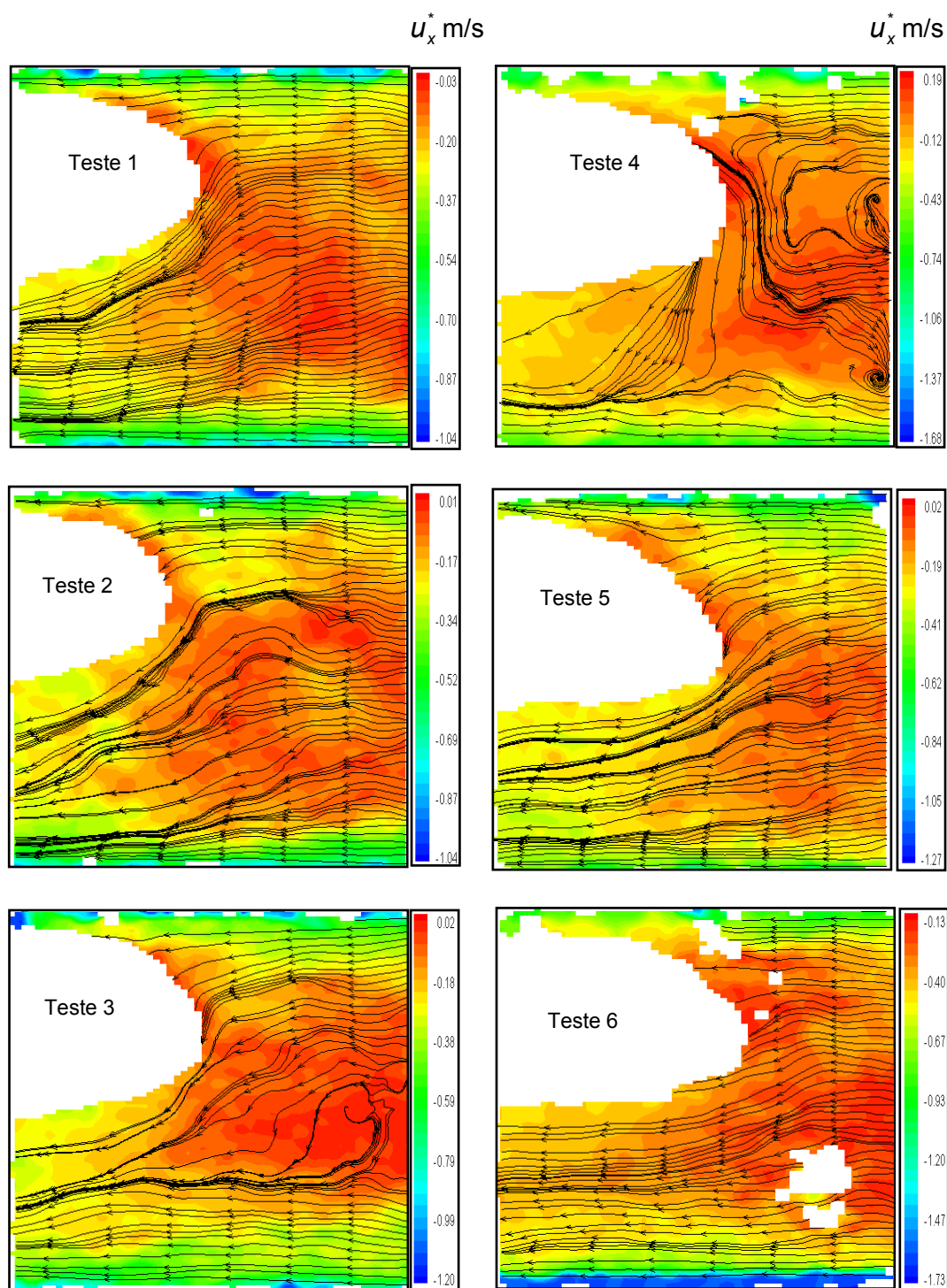


Figura 6.27 – Resultados para os campos instantâneos de velocidade do líquido na região do nariz da bolha, medidos em relação ao referencial da bolha para tubo inclinado. Escala de cores representa a velocidade na direção axial subtraída da velocidade da bolha.

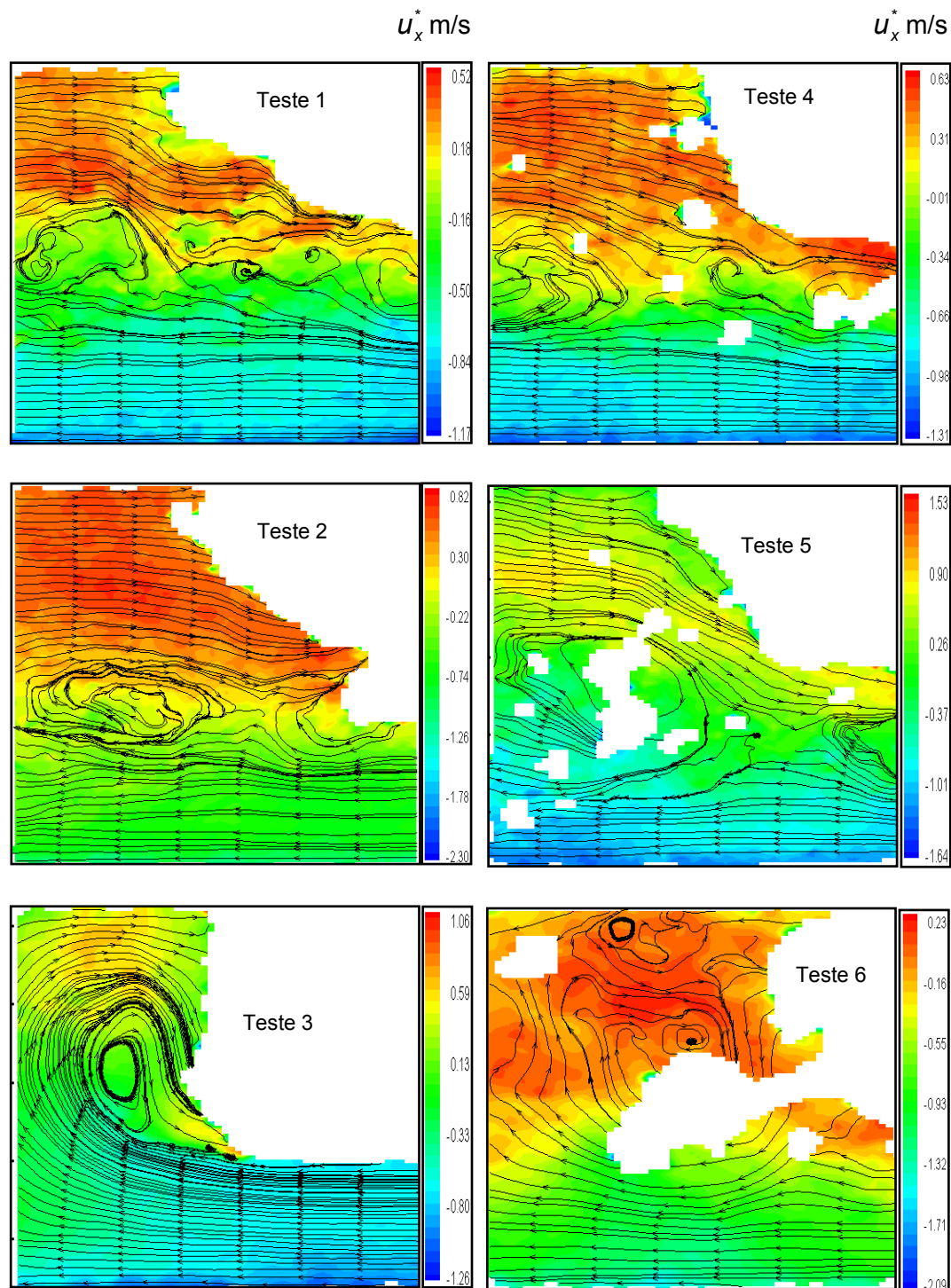


Figura 6.28 – Campo instantâneo de velocidade de líquido na região da cauda da bolha - esc. horizontal referencial em movimento. Escala de cores representa a velocidade na direção axial subtraída da velocidade da bolha.

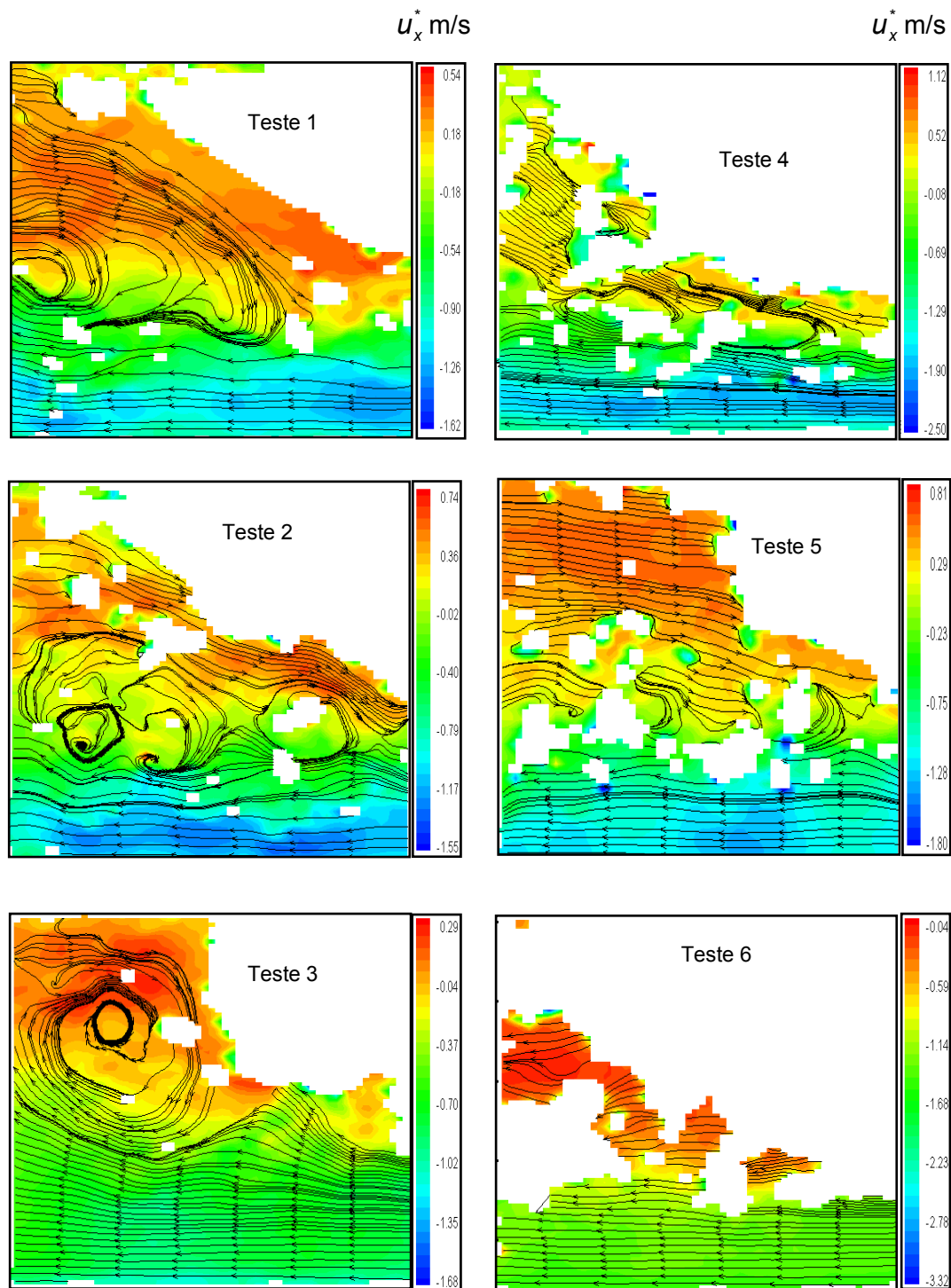


Figura 6.29 – Campo instantâneo de velocidade de líquido na região da cauda da bolha - esc. inclinado referencial em movimento. Escala de cores representa a velocidade na direção axial subtraída da velocidade da bolha.

6.4.3. Perfis de velocidade média

Na seção anterior foram mostrados os resultados dos campos de velocidade instantâneos obtidos para escoamento horizontal e inclinado a 5°. Apesar de fornecerem informações originais importantes sobre o caráter global do escoamento, informações sobre perfis de velocidade média em determinadas posições axiais são consideradas também de grande relevância, principalmente para a validação de simulações numéricas.

Os perfis radiais das componentes horizontal e vertical da velocidade foram obtidos a partir da aquisição de 150 imagens para cada par de velocidades superficiais de líquido e gás que caracterizavam os seis testes realizados. As componentes horizontal e vertical da velocidade foram obtidas pelas equações 6.4 e 6.5 mostradas respectivamente abaixo.

$$\bar{u}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i(x, y) \quad \text{Eq. (6.4)}$$

$$\bar{v}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i(x, y) \quad \text{Eq. (6.5)}$$

Uma característica particular do escoamento intermitente está no fato das bolhas não apresentarem velocidades e tamanhos constantes. Assim, a simples aquisição de várias medidas impossibilitava a estimativa da velocidade média no ponto desejado, pois em cada uma delas a bolha de gás estaria em uma posição axial diferente relativamente às coordenadas da imagem. Para contornar este problema, em cada imagem selecionada, a posição do nariz da bolha era identificada e tomada como referência para a determinação da coordenada axial das posições de onde os perfis de velocidade seriam extraídos em cada imagem instantânea para a posterior formação do perfil de velocidade média.

No presente trabalho foram selecionadas algumas posições axiais ao longo do tubo para a determinação dos perfis de velocidade média. Estas posições axiais eram sempre referenciadas à posição do nariz da bolha, que era a origem do sistema de coordenada axial. Foram computados perfis de velocidade média nas seguintes posições axiais dada em termos do diâmetro do tubo: +0.2D, +0.4D, +0.6D e +0.8D a montante do nariz da bolha e -0.8D, -0.6D, -0.4D e -0.2D a jusante do nariz da bolha. As posições com coordenadas

positivas situam-se no pistão de líquido a montante da bolha, enquanto as coordenadas negativas referem-se a posições axiais na região do início do filme de líquido, sob a bolha. A Figura 6.30 apresenta a posição de alguns dos perfis superpostos à imagem da bolha para facilitar o entendimento da localização dos perfis.

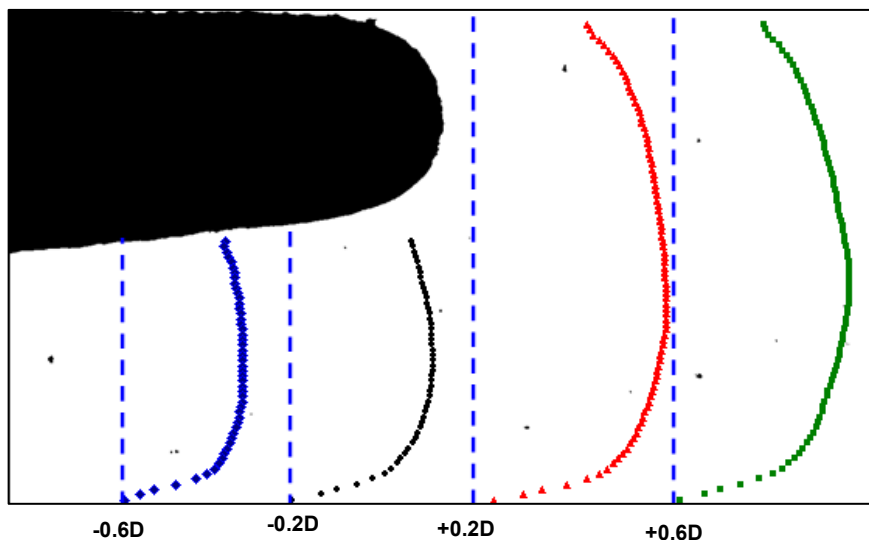


Figura 6.30 – Ilustração da posição axial onde foram computados perfis de velocidade média.

É importante ressaltar que somente foram considerados válidos para o conto dos valores médios perfis de velocidade em regiões onde, no mínimo, 50 pontos de vetores de velocidade tivessem sido medidos nos campos instantâneos.

6.4.3.1.

Comparação dos perfis médios com perfil teórico

O perfil médio de velocidade obtido experimentalmente pela técnica de PIV para a região do pistão de líquido foi comparado com os resultados analíticos, para o caso de escoamento hidrodinamicamente desenvolvido em regime turbulento. O perfil turbulento desenvolvido em duto circular pode ser aproximado pela relação dada pela equação 6.6, onde o expoente vale $m=1/7$, para a faixa de número de Reynolds de interesse. (ver, por exemplo, Schlichting 1968). Na expressão abaixo, r e R são, respectivamente, a coordenada radial e o raio do tubo. A velocidade axial e a máxima velocidade no tubo são representadas por u e U_{max} .

$$\frac{u}{U_{\max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^m \quad \text{Eq. (6.6)}$$

A Figura 6.31 apresenta o resultado desta comparação. A posição escolhida para a comparação foi a posição axial +0,8D, posição mais afastada do nariz da bolha onde a medição foi realizada. Na comparação, foram usados os resultados dos campos instantâneos de velocidade medidos para os testes 1, 4 e 6 para as configurações horizontal e inclinada.

Observando esta Figura, a velocidade axial é apresentada em função da coordenada transversal que se confunde com o raio do tubo no plano central do tubo onde as medidas foram realizadas. As linhas cheias representam as previsões da equação 6.6 para as condições de cada teste, enquanto os símbolos representam os dados experimentais médios extraídos dos campos instantâneos de velocidade.

Nota-se uma discordância entre os experimentos e o perfil analítico que pode ser atribuído ao fato da análise ter sido realizada numa posição próxima ao nariz da bolha na qual o escoamento ainda não se encontrava desenvolvido. Talvez em posições axiais mais afastadas o efeito da presença da bolha fosse menos relevante e um perfil desenvolvido poderia prevalecer. As medições realizadas não forneceram perfis de velocidade mais afastados para comprovar esta afirmação.

Deve-se notar que a falta de continuidade verificada na derivada do perfil analítico na linha de centro do tubo é uma limitação imposta pelo modelo representado pela equação 6.6.

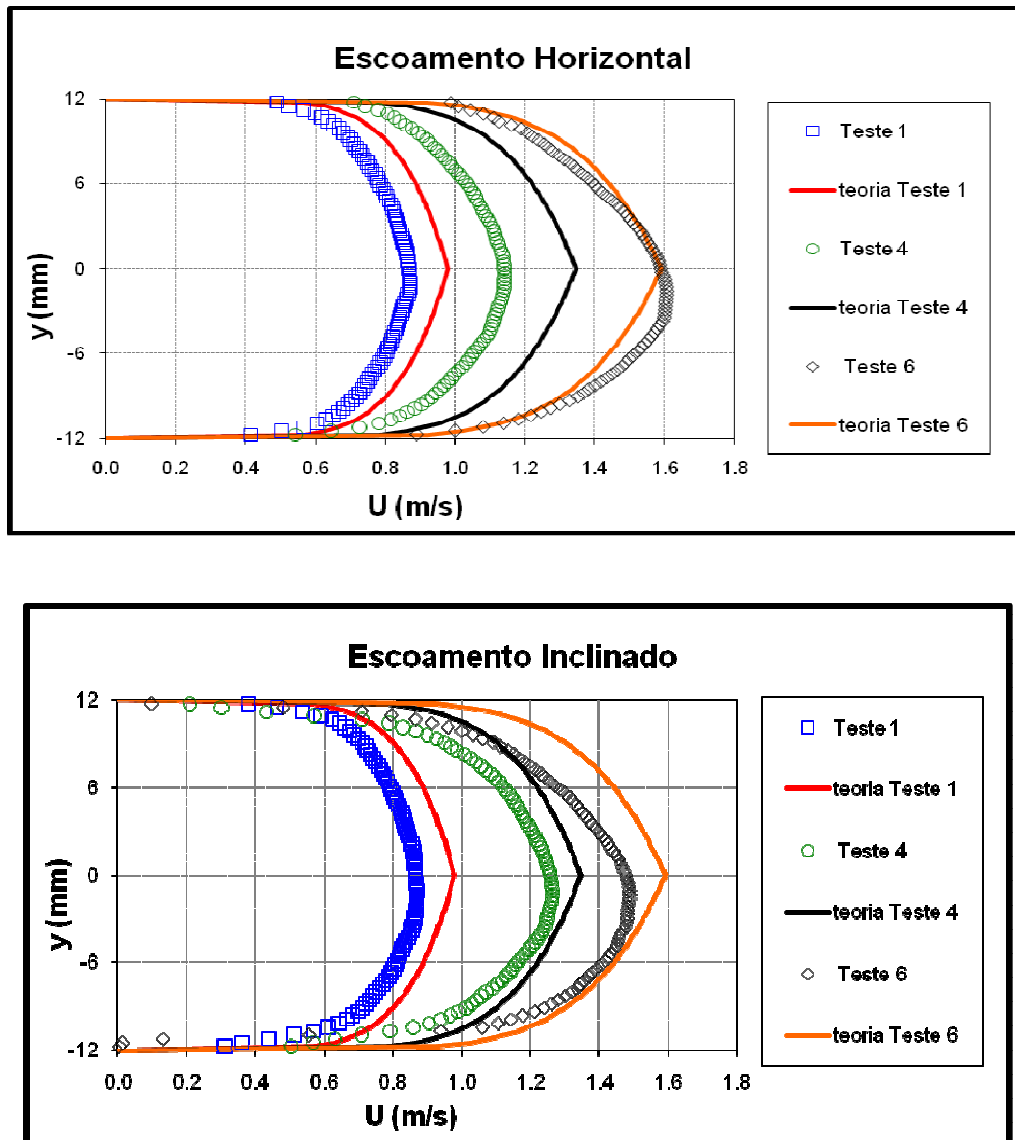


Figura 6.31 - Comparação do perfil analítico de velocidade para escoamento turbulento hidrodinamicamente desenvolvido e os perfis medidos experimentalmente no presente, trabalho para tubo horizontal e inclinado.

6.4.3.2.**Perfis transversais da velocidade média no filme na direção axial**

Os perfis transversais da componente axial da velocidade média são apresentados nas Figuras 6.32 a 6.35 para as configurações horizontal e inclinada. Em cada figura são apresentadas as seis condições de teste investigadas. Abaixo de cada um dos seis gráficos que compõem cada figura, estão indicadas as posições axiais onde os perfis foram medidos. Como já descrito, algumas destas posições se localizam na região do pistão de líquido e outras na região do filme sob a bolha. Perfis de velocidade do líquido na região do filme são limitados à extensão desta região, portanto aparecem limitados em altura nos gráficos. Deve-se notar que todos os perfis apresentados são medidos em relação ao referencial do laboratório.

Os perfis de velocidade axial média do líquido na região do filme sob a bolha são apresentados nas Figuras 6.68 e 6.69, para as configurações horizontal e inclinada respectivamente.

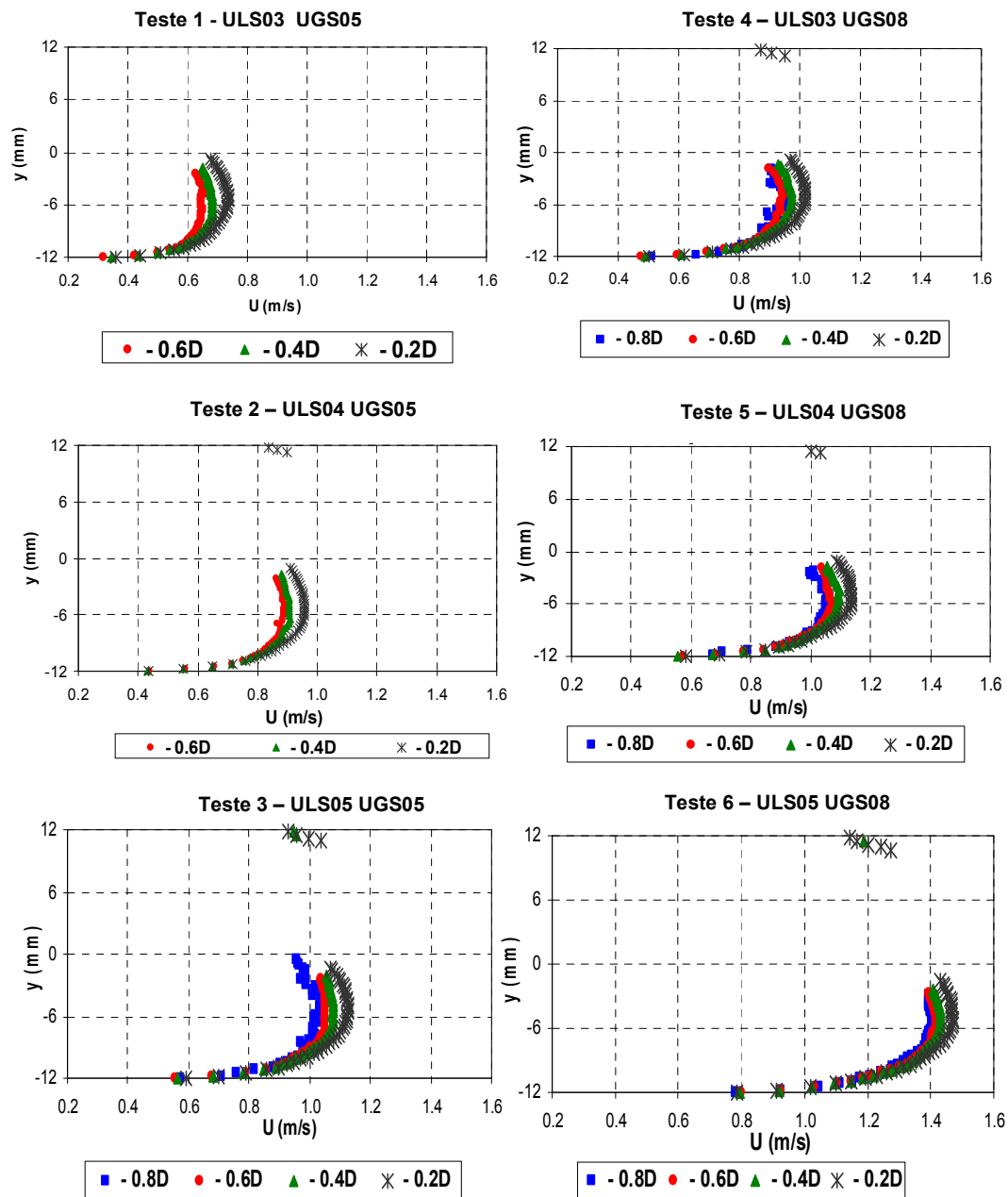


Figura 6.32 - Perfis de velocidade axial médio no filme de líquido para escoamento horizontal.

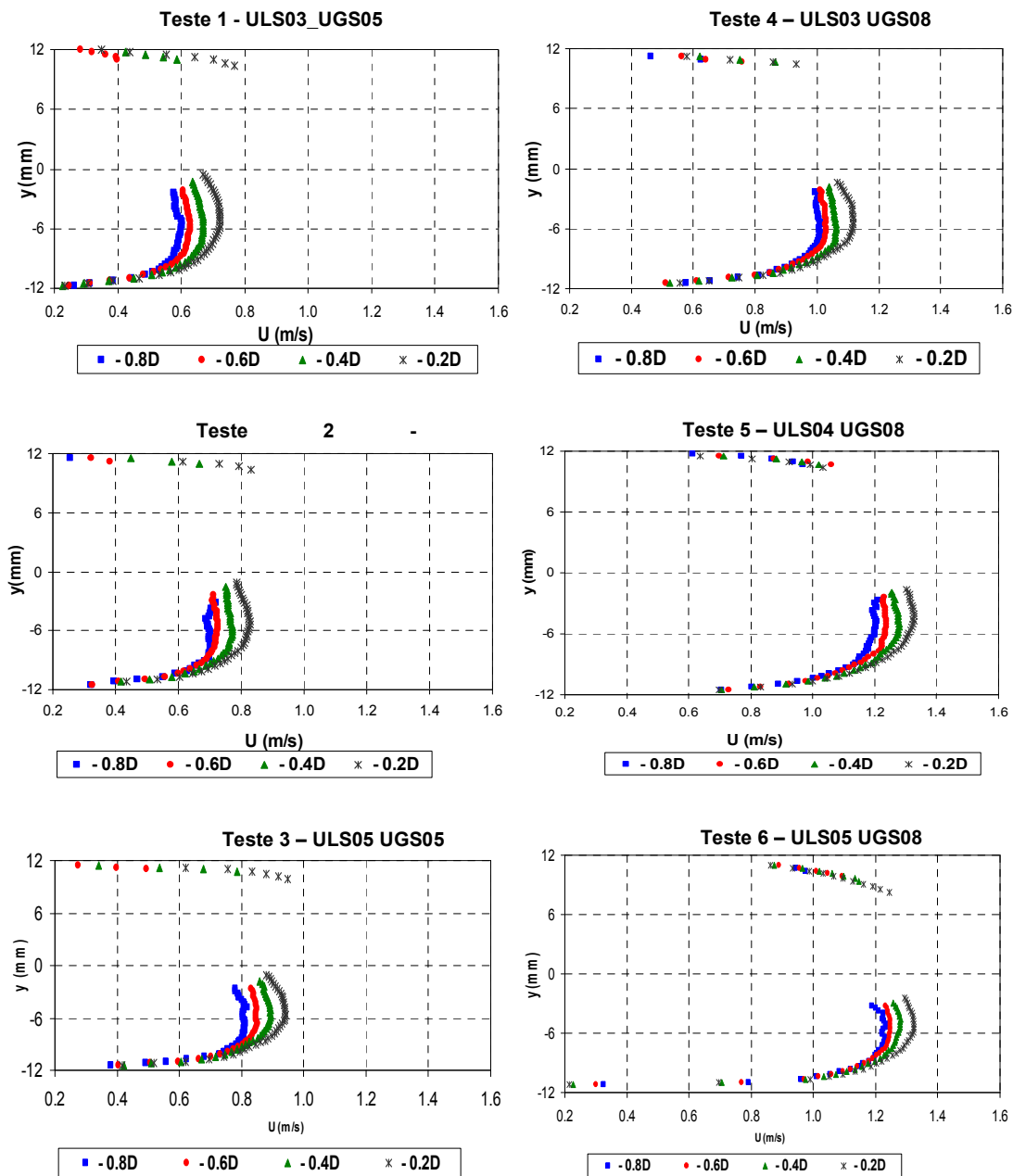


Figura 6.33– Perfis de velocidade axial médio no filme de líquido para escoamento inclinado.

As observações a respeito do perfil de velocidade no filme podem ser de grande utilidade, uma vez que diversos modelos existentes para o escoamento *slug* consideram um escoamento plenamente desenvolvido na região do filme de líquido (Issa & Kempf 2003). Uma análise geral da Figura 6.68 revela que os perfis de velocidade nas diversas estações axiais a montante do nariz da bolha da região do filme não apresentam diferenças significativas entre si. Esta pequena variação nos perfis talvez seja devido à pequena diferença no valor das

coordenadas axiais das estações consideradas, que são limitadas pelo campo de visão da câmera usada na determinação dos campos de velocidade dos quais os perfis foram extraídos. Por limitação de tempo não foram obtidos perfis em regiões mais a jusante do nariz da bolha como seria desejável para verificar o desenvolvimento dos perfis de velocidade em toda extensão da região do filme. Fica aqui esta sugestão para a continuação do trabalho apresentado.

Os perfis de velocidade apresentam um comportamento caracterizado por uma velocidade tendendo a zero na parede sólida do tubo, um crescimento acentuado, apresentando um ponto de máximo nítido, e uma redução próximo à interface. Na interface verifica-se uma variação no sinal de derivada indicando uma velocidade menor na interface líquido-gás do que em pontos adjacentes no interior do filme. Mesmo no caso indicado como Teste 4 na Figura 6.68 que representa o maior valor testado para a velocidade do gás combinado com a menor velocidade do líquido, ainda verifica-se a velocidade máxima do líquido acima do valor da velocidade junto à interface. É verificada a tendência de menores níveis de velocidade para posições axiais mais afastadas do nariz da bolha.

É interessante notar que o valor da derivada dos perfis de velocidade junto à parede sólida e, portanto, a tensão cisalhante na parede, é o mesmo para todas as posições axiais indicadas. Também junto à interface com a fase gasosa, a derivada do perfil de velocidade é semelhante, apesar do valor da velocidade diferir para cada posição axial.

No caso do escoamento em tubo inclinado apresentado na Figura 6.35, a posição mais perto da linha de centro do tubo assumida pela bolha de gás permite a medição de perfis de velocidade também na parte superior do tubo. Nota-se maiores diferenças entre as velocidades na região do filme para as posições axiais medidas, comparativamente ao caso horizontal. Em alguns testes, os níveis de velocidade no filme para o caso inclinado são mais elevados que no escoamento horizontal. Em outros a situação se inverte. Acredita-se que um maior número de amostras utilizadas no cálculo dos perfis médios possa ajudar a esclarecer estas discrepâncias.

A seguir, nas figuras 6.34 e 6.35 serão apresentados os resultados obtidos para o perfil médio de velocidade axial na região do pistão de líquido, respectivamente para os casos horizontal e inclinado.

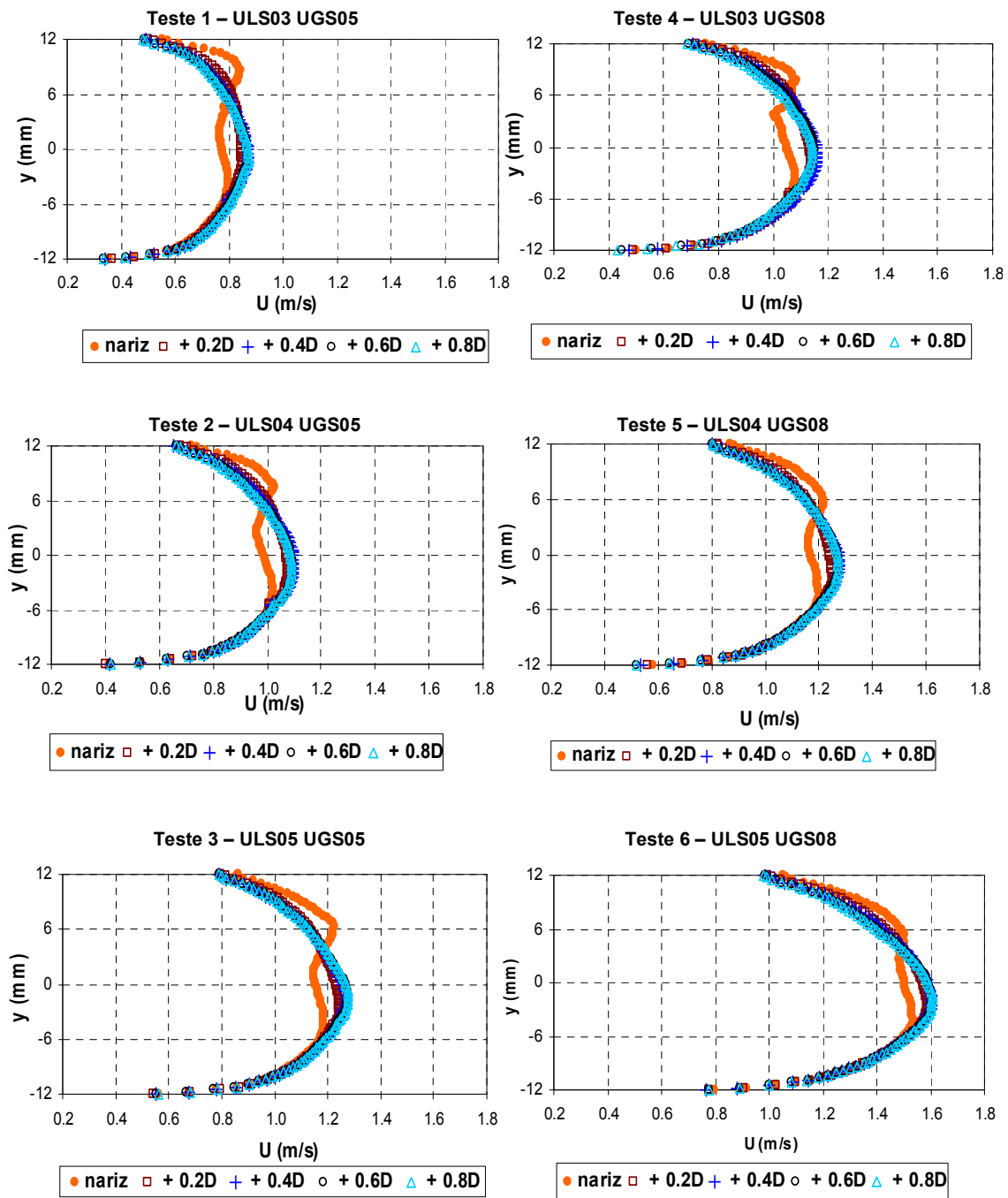


Figura 6.34 – Perfil de velocidade axial na região do pistão para os testes realizados no escoamento horizontal.

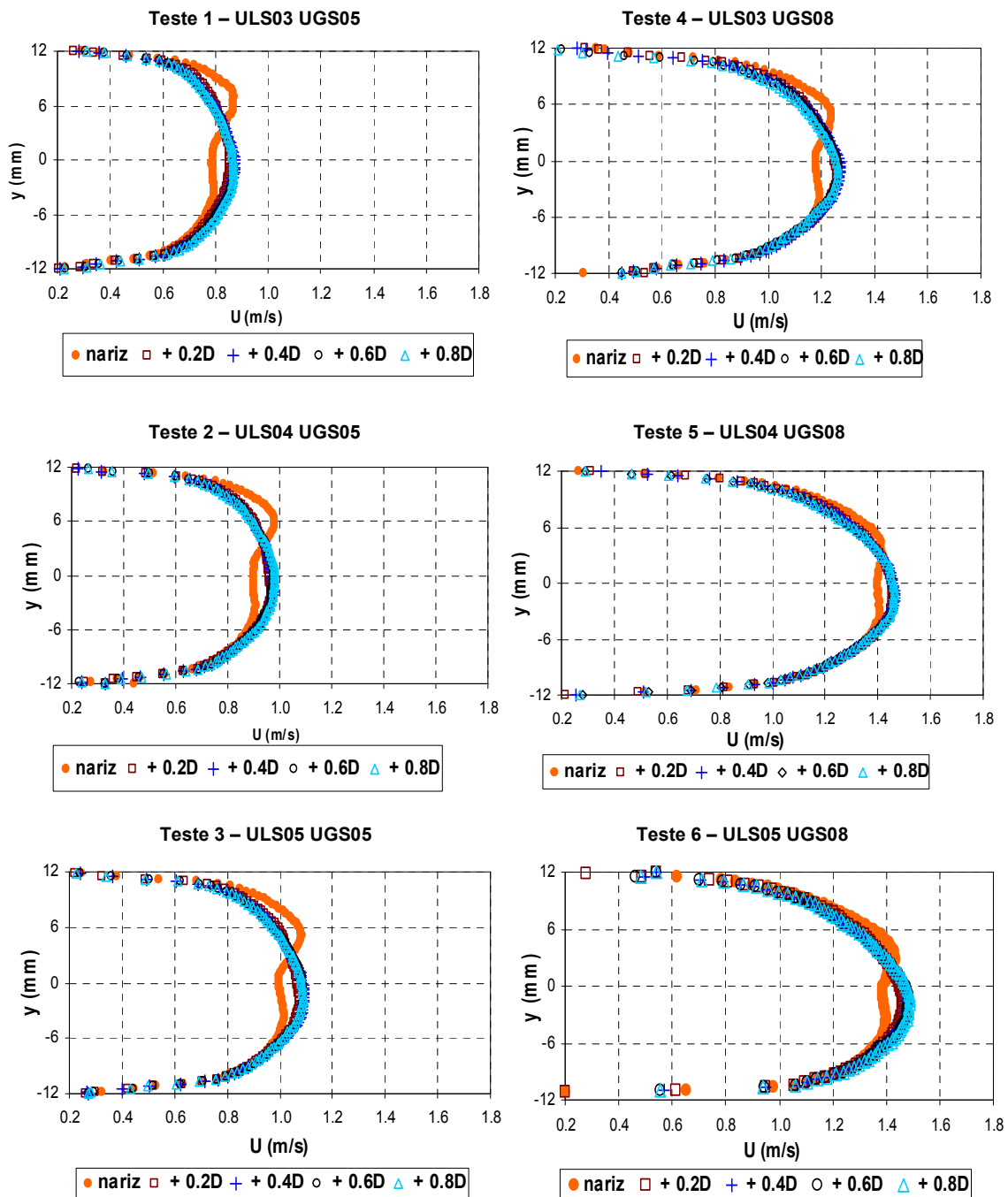


Figura 6.35 - Perfis de velocidade axial na região do pistão para os testes realizados no escoamento inclinado.

Analisando o perfil médio de velocidade na região do pistão nas figuras 6.34 e 6.35, é possível observar um aumento do perfil de velocidade, conforme o aumento da velocidade de mistura. O perfil de velocidade apresentou-se com seu valor máximo deslocado do centro da tubulação e direcionado para a porção inferior da mesma. Este comportamento foi mais pronunciado conforme o aumento da vazão.

O escoamento horizontal apresentou velocidades maiores que o escoamento inclinado, com exceção dos testes 4 e 5 onde a velocidade do escoamento inclinado apresentou-se maior que o horizontal.

Na região do nariz da bolha, o perfil de velocidade mostra um comportamento diferente das demais regiões, podendo estar associado ao deslocamento do líquido pela bolha de gás, que se desloca em maior velocidade, conforme foi discutido na seção anterior quando foi adotada a velocidade da bolha como referencial.

Conforme mencionado em capítulos anteriores, não foi possível a realização de medidas experimentais de forma contínua, visto que foi necessária a utilização de “trigger” através do sistema de interruptores de feixe durante o processo de aquisição dos 150 campos de velocidades instantâneos para cálculo do perfil médio de velocidade. Desta forma, não foi possível a comparação entre os valores obtidos experimentalmente com os resultados obtidos pela técnica anterior para medição da velocidade de deslocamento das bolhas.

6.4.3.3.

Perfis transversais da velocidade transversal média no filme

Perfis de velocidade média transversal também foram extraídos dos campos de velocidade instantâneos obtidos pela técnica *PIV* implementada. Nas Figuras 6.36 e 6.37 são apresentados os resultados do perfil de velocidade nesta direção para a região do filme de líquido, tanto do escoamento horizontal, quanto do inclinado.

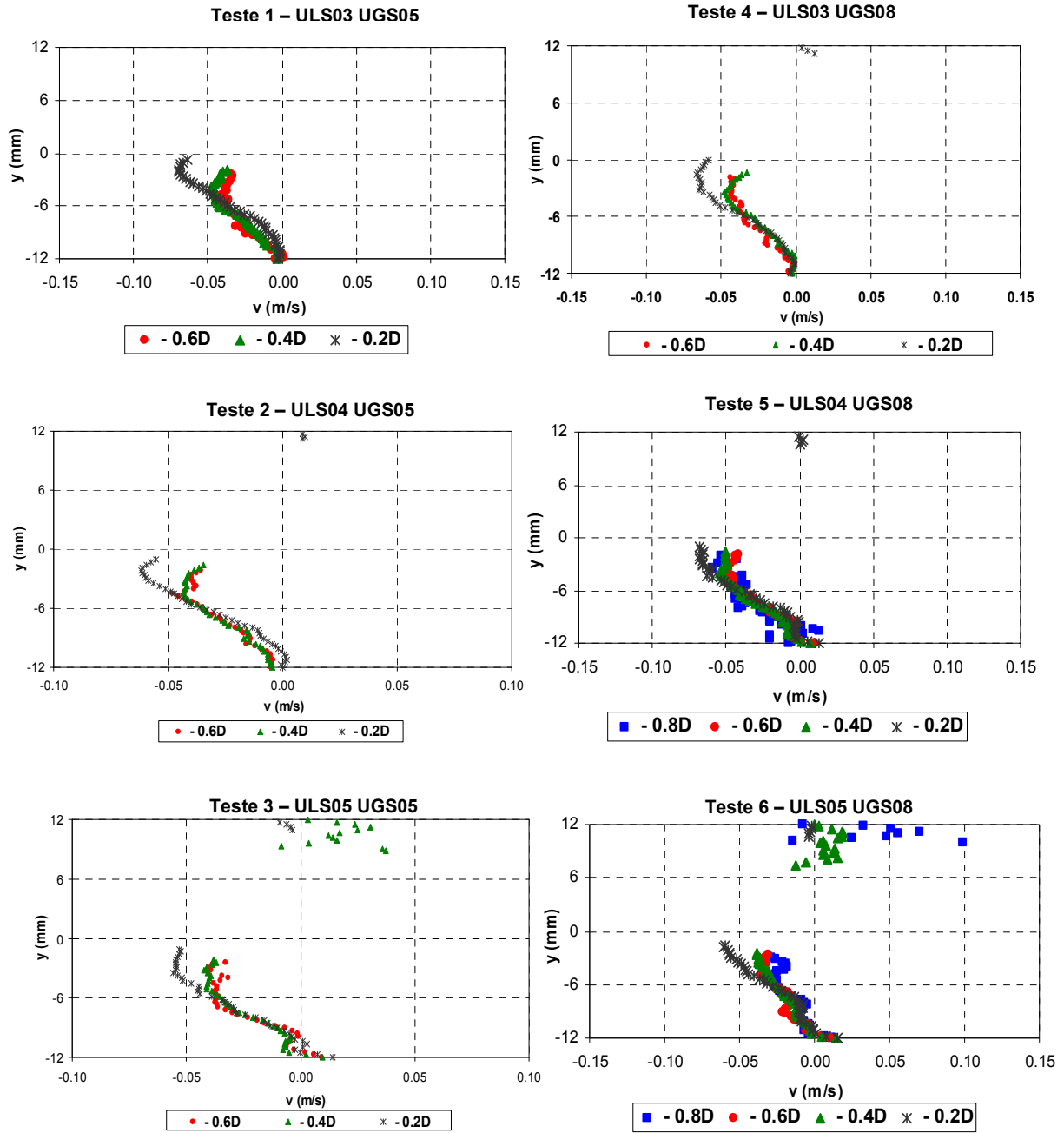


Figura 6.36 – Perfis de velocidade transversal na região do filme de líquido para escoamento horizontal.

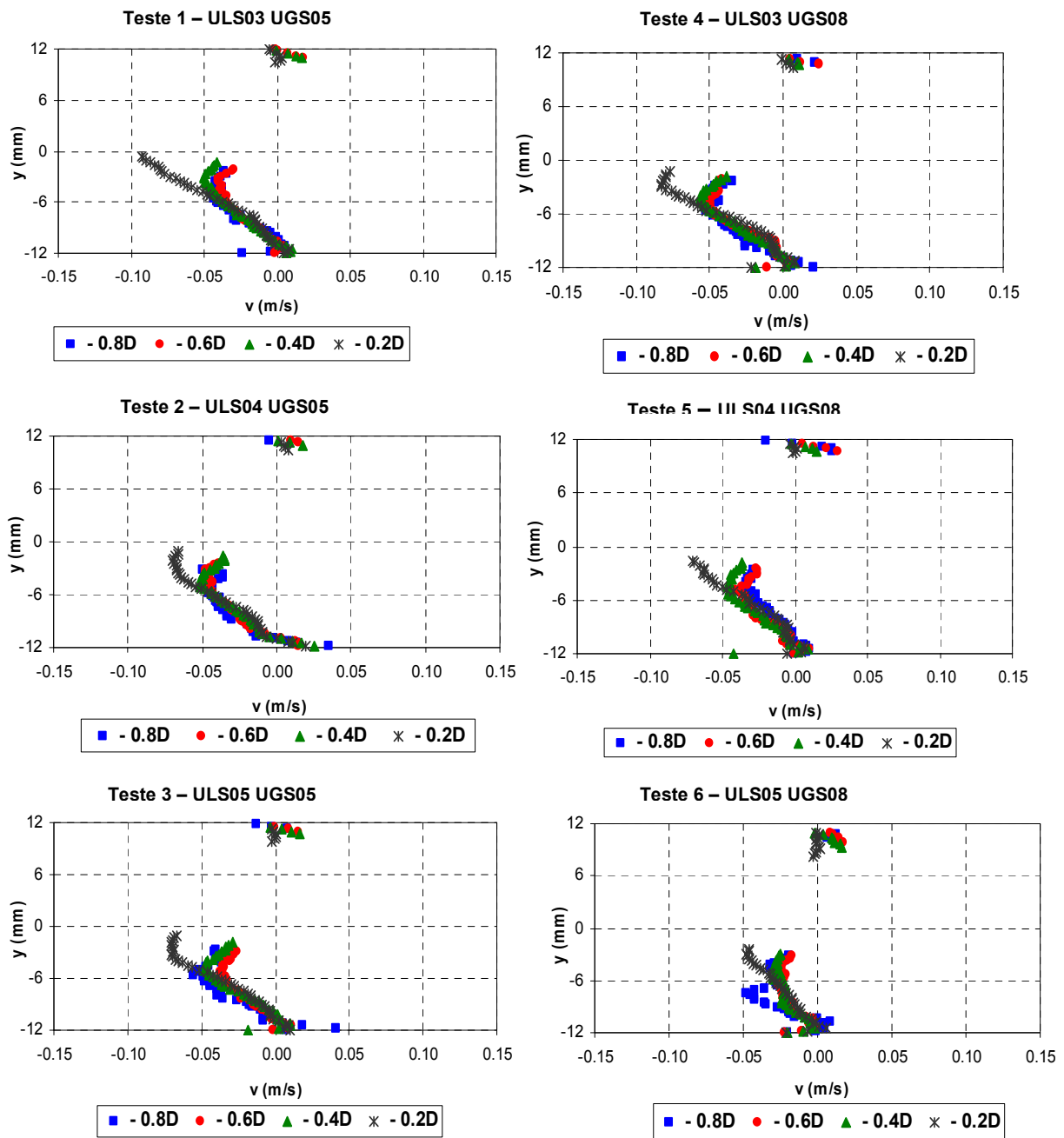


Figura 6.37 – Perfis de velocidade transversal na região do filme de líquido para escoamento inclinado.

Para o filme de líquido, em ambos os escoamentos estudados, nota-se que a velocidade na direção transversal do tubo é praticamente nula. Apesar disso, ela vai tornando-se negativa conforme se aproxima da interface com a bolha, o que indica o deslocamento do líquido pela passagem da bolha. Este fenômeno foi discutido na seção anterior, quando os campos de velocidades instantâneos foram medidos e um referencial em movimento (a bolha de gás) foi adotado.

Os pontos mais próximos ao nariz da bolha ($-0.2D$) mostram valores mais negativos quando comparados com as regiões mais afastadas, por conta da maior interferência da velocidade do nariz da bolha sobre a região de líquido. Além disso, nos teste com menores velocidades de mistura (teste 1, 2, 3 e 4) do escoamento horizontal, conforme se aprofundou na região do filme, as medições do perfil de velocidade na direção transversal tornaram-se mais imprecisas, o que explica a exclusão de pontos na região $-0.8D$ para estes casos.

Analisando os Testes de 1 a 6 no escoamento inclinado, observa-se que a ocorrência de velocidade transversal descendente apresentou-se mais atenuada conforme houve um aumento na velocidade de mistura.

A mesma análise para a velocidade na seção transversal foi realizada para o líquido situado à frente da bolha de gás e os resultados são apresentados nas Figuras 6.38 e 6.39.

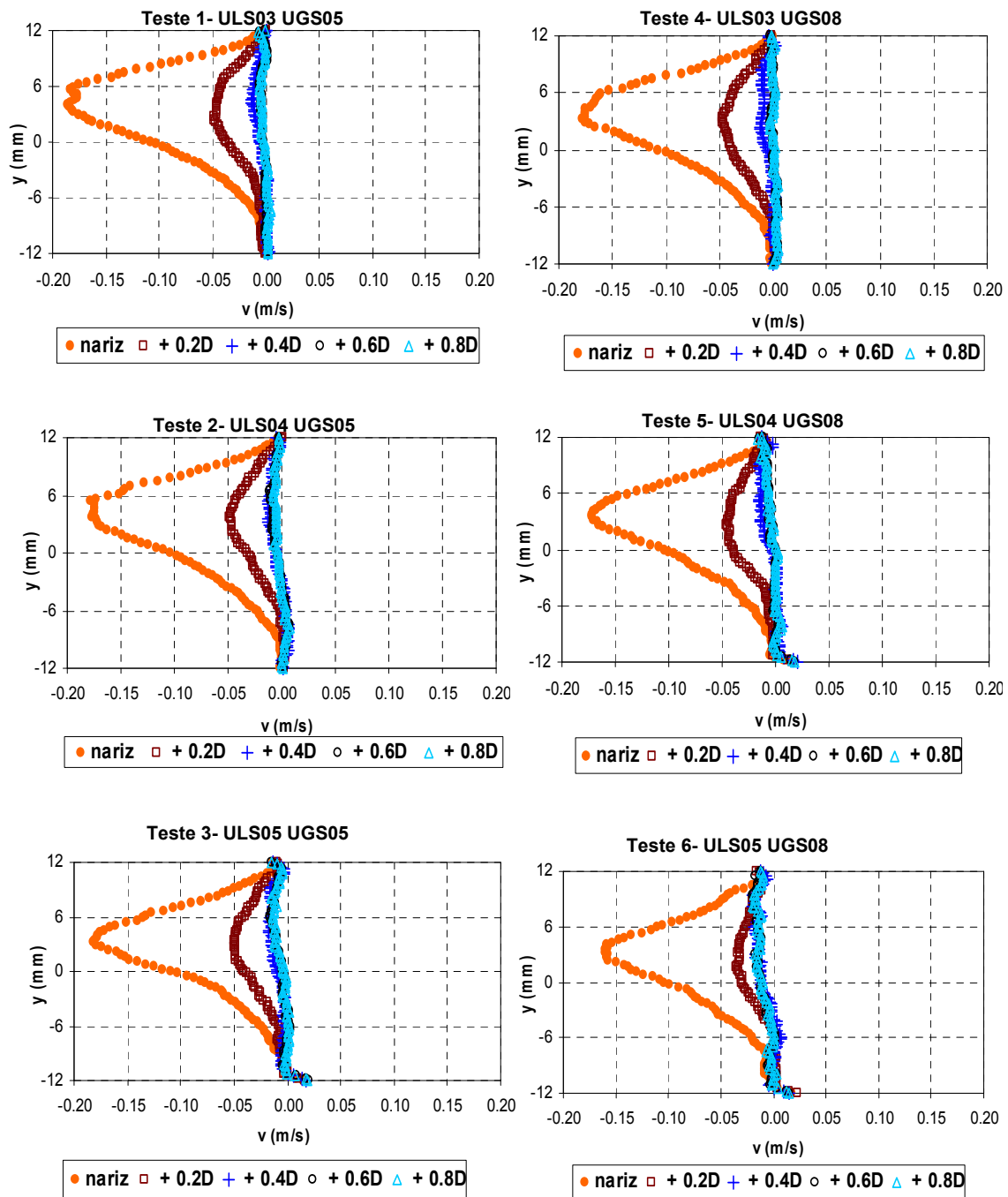


Figura 6.38 – Perfis de velocidade transversal média na região do pistão de líquido para escoamento horizontal.

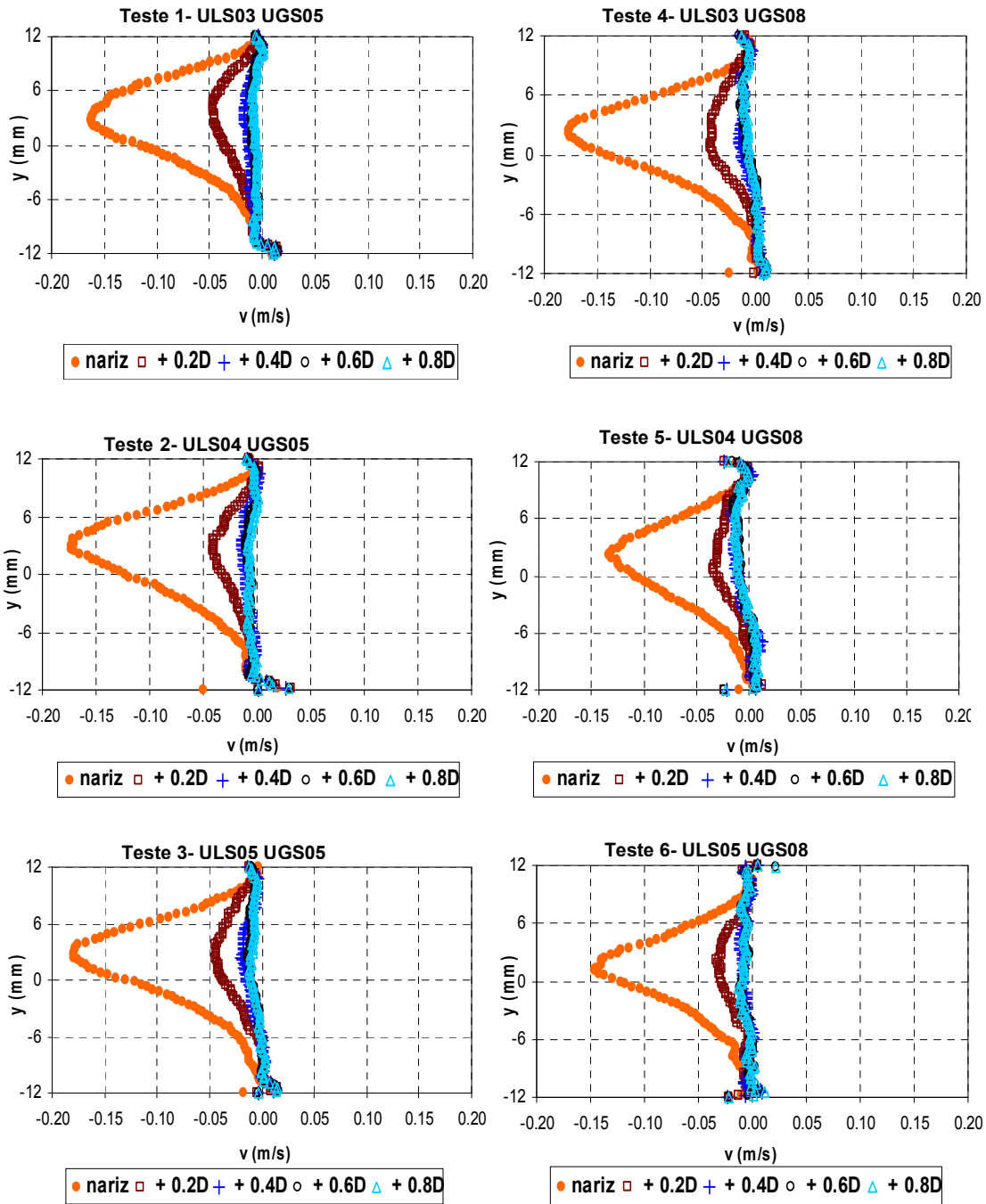


Figura 6.39– Perfis de velocidade transversal média na região do pistão de líquido para escoamento inclinado.

Para o pistão de líquido, os perfis de velocidades transversais também apresentaram baixos valores. Analisando as figuras anteriores, observa-se um pico de velocidade descendente na direção transversal para a região do nariz da bolha. A região mais próxima ao nariz ($0.2D$) também apresenta valores negativos de velocidade, conforme se direciona para o centro da tubulação. Para ambos os casos, caminhando em direção ao topo da tubulação, os valores de velocidade voltam a tender a zero. Tais resultados indicam estas regiões como sendo as mais influenciadas pela maior velocidade da bolha de gás.

Conforme ocorre o afastamento em relação nariz da bolha, a velocidade transversal apresentou-se praticamente nula.

A partir dos resultados discutidos até o momento, a estrutura do escoamento intermitente pode ser resumida da Figura 6.40 à 6.43. Nelas, a “célula unitária” será apresentada juntamente com o perfil médio de velocidade obtido experimentalmente pelo PIV. Serão analisadas as regiões do filme situadas nas posições $-0.4D$ e $-0.8D$, assim como as regiões do pistão distantes $+0.4D$ e $+0.8D$, tomando como referência o nariz da bolha.

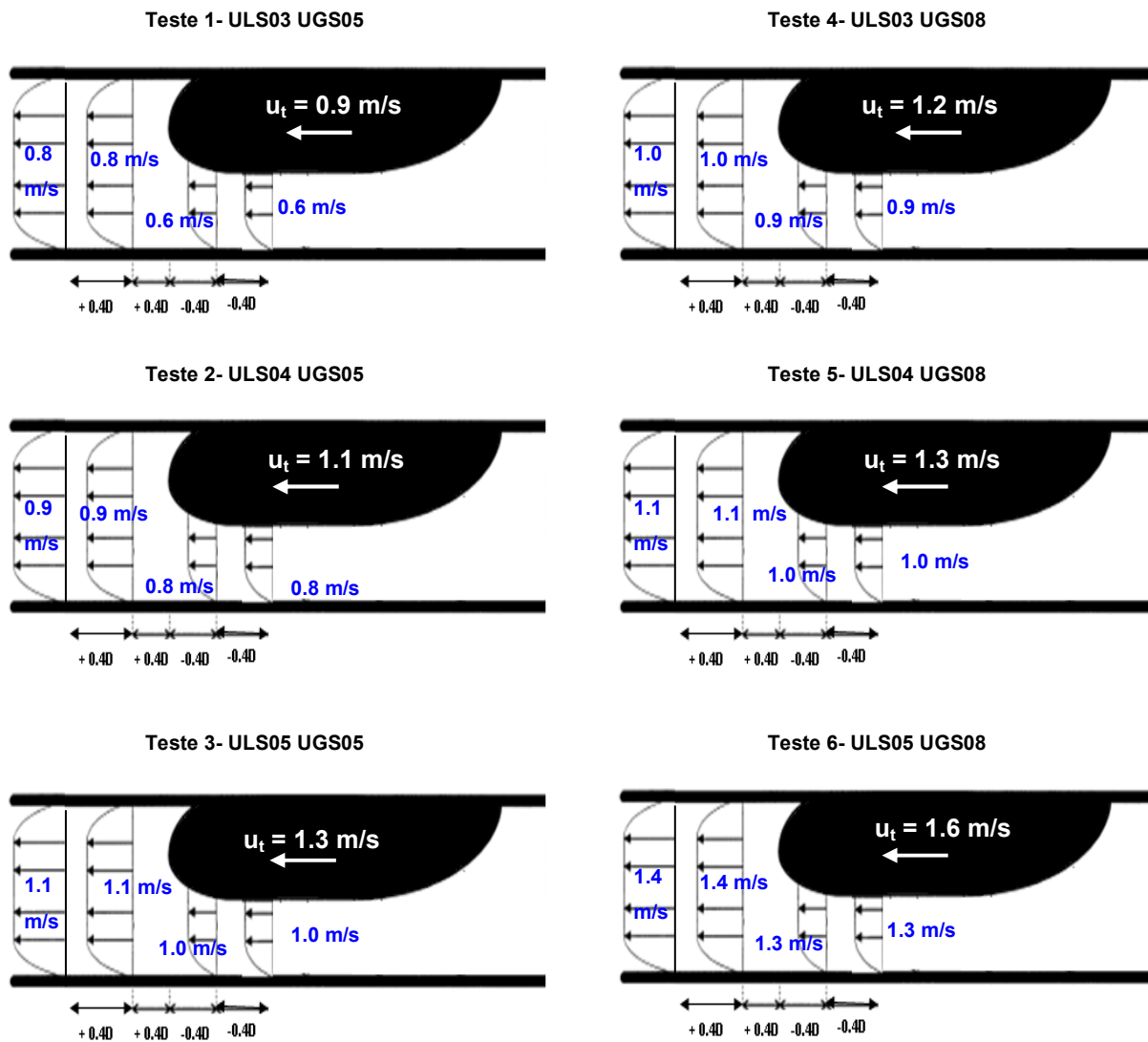


Figura 6.40 – Estrutura do escoamento horizontal intermitente analisando sob o ponto de vista do referencial estático (figura baseada em Kawaji 1998).



Figura 6.41 – Estrutura do escoamento inclinado intermitente analisando sob o ponto de vista do referencial estático (figura baseada em Kawaji 1998).

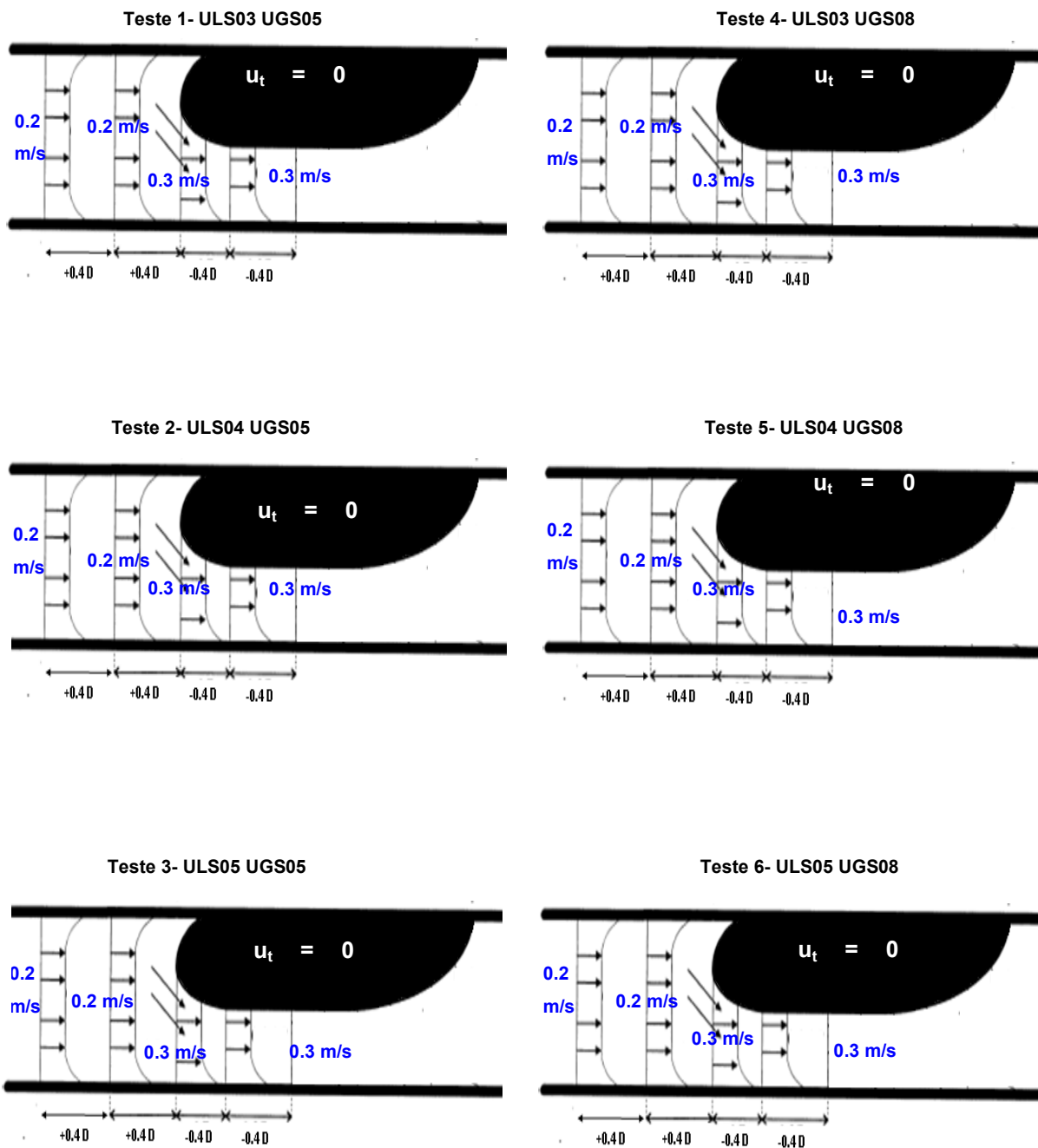


Figura 6.42 – Estrutura do escoamento horizontal intermitente analisando sob o ponto de vista do referencial em movimento (baseado em Kawaji 1998).

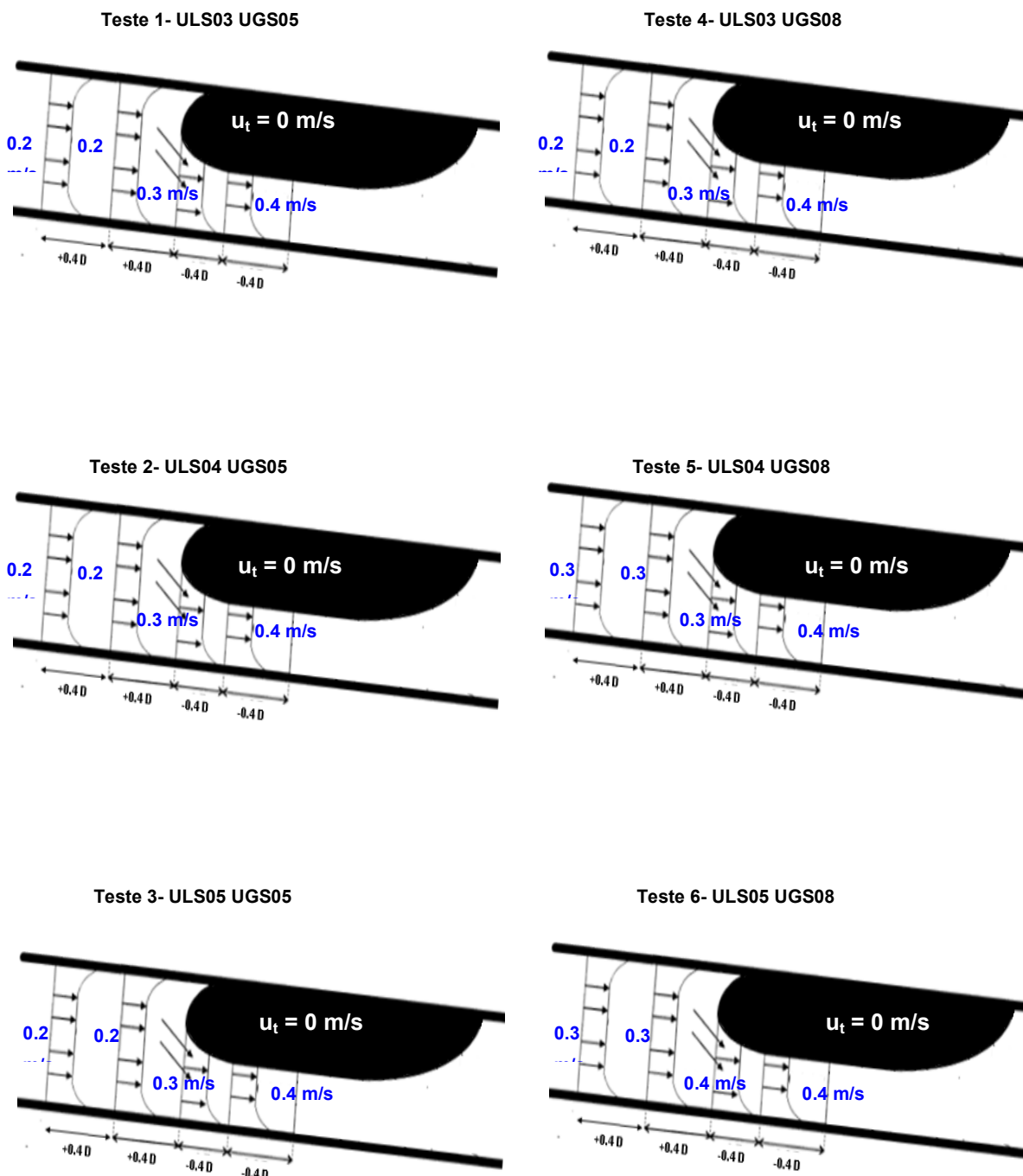


Figura 6.43 – Estrutura do escoamento inclinado intermitente analisando sob o ponto de vista do referencial em movimento (baseado em Kawaji 1998).

Analisando os resultados é possível observar uma desaceleração do líquido na região do filme. A velocidade da bolha de gás foi considerada como sendo a máxima velocidade na frente da bolha.

6.4.4.**Extração das velocidades e grandezas turbulentas**

Nesta seção será feita uma breve discussão sobre parâmetros relacionados à turbulência os quais foram medidos experimentalmente por meio da técnica de PIV utilizada no trabalho. As velocidades no escoamento turbulento podem ser descritas por uma componente média no tempo somada à uma flutuação, como indicado nas equações 6.7 e 6.8.

$$\text{Dir. axial - } u(x, y, z) = \bar{u}(x, y, z) + u'(x, y, z) \quad \text{Eq. (6.7)}$$

$$\text{Dir. transv. - } v(x, y, z) = \bar{v}(x, y, z) + v'(x, y, z) \quad \text{Eq. (6.8)}$$

Os principais parâmetros relacionados à turbulência são baseados na flutuação da componente de velocidade. É comum a prática de descrever a intensidade da turbulência com base no valor quadrático médio da variável (*rms*, do inglês *root mean square*). A flutuação média local das componentes de velocidade ($\mathbf{u}'_{rms}$ na direção axial e $\mathbf{v}'_{rms}$ na direção transversal) serão utilizadas em nossa análise.

Conforme apresentado anteriormente, tanto o campo de velocidade instantâneo quanto a velocidade média do escoamento foram medidas ao longo deste trabalho. Desta forma, foi possível o cálculo da flutuação da velocidade ($\mathbf{u}'$ e $\mathbf{v}'$) tanto na direção axial quanto na transversal. Para o cálculo da flutuação da velocidade média local, a eq. (6.9) foi adotada:

$$u'_{rms}(x, y) = \sqrt{\overline{u'(x, y, t)^2}}; \quad v'_{rms}(x, y) = \sqrt{\overline{v'(x, y, t)^2}} \quad \text{Eq. (6.9)}$$

Onde a barra nas equações acima significa média temporal (*Batchelor 1982*)

Sendo assim, a flutuação da velocidade global pode ser calculada pela seguinte relação (eq.6.10):

$$u^*_{rms}(x, y) = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\overline{u'(x, y)^2} + \overline{v'(x, y)^2} + \overline{w'(x, y)^2} \right)} \quad \text{Eq. (6.10)}$$

Devido à natureza bi-dimensional do estudo realizado e pelo fato da turbulência se tratar de um fenômeno tridimensional, foi feita uma aproximação na estimativa da terceira componente da velocidade ($\mathbf{w}$). Para esta variável, foi assumido o mesmo valor observado pela componente transversal ($\mathbf{v}$), de forma que a equação anterior pode ser reduzida para a seguinte equação (6.11):

$$u_{rms}^*(x, y) = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\overline{u'(x, y)^2} + 2\overline{v'(x, y)^2} \right)} \quad \text{Eq. (6.11)}$$

A partir do cálculo desta variável, é possível a estimativa da intensidade turbulenta (I) do escoamento e também a energia cinética turbulenta (κ), variáveis estas calculada pelas equações abaixo:

$$I = \frac{u_{rms}^*}{u} \quad \text{e} \quad \kappa = \frac{3}{2} (u_{rms}^*)^2 \quad \text{Eq. (6.12)}$$

Nas Figuras 6.44 e 6.45, os resultados obtidos para a análise da turbulência no escoamento horizontal serão apresentados. Conforme poderá ser visto, a flutuação da velocidade apresentou um ligeiro aumento com o aumento da velocidade da mistura, com seu resultado sendo ainda mais pronunciado à frente da bolha.

Em todos os testes, a intensidade turbulenta, apresentou maiores valores na região próxima às paredes da tubulação, não sendo observada nenhuma relação com a velocidade das fases. Este comportamento apresenta-se representado pelas Figuras 6. 46 e 6.47. Analisando a intensidade turbulenta é importante ressaltar que no filme de líquido, mesmo se tratando de escoamento laminar, os resultados observados para esta variável apresentaram comportamento semelhante ao pistão. Este fenômeno está associado ao fato que a turbulência não se dissipa no curto espaço de tempo da presença da bolha no filme de líquido.

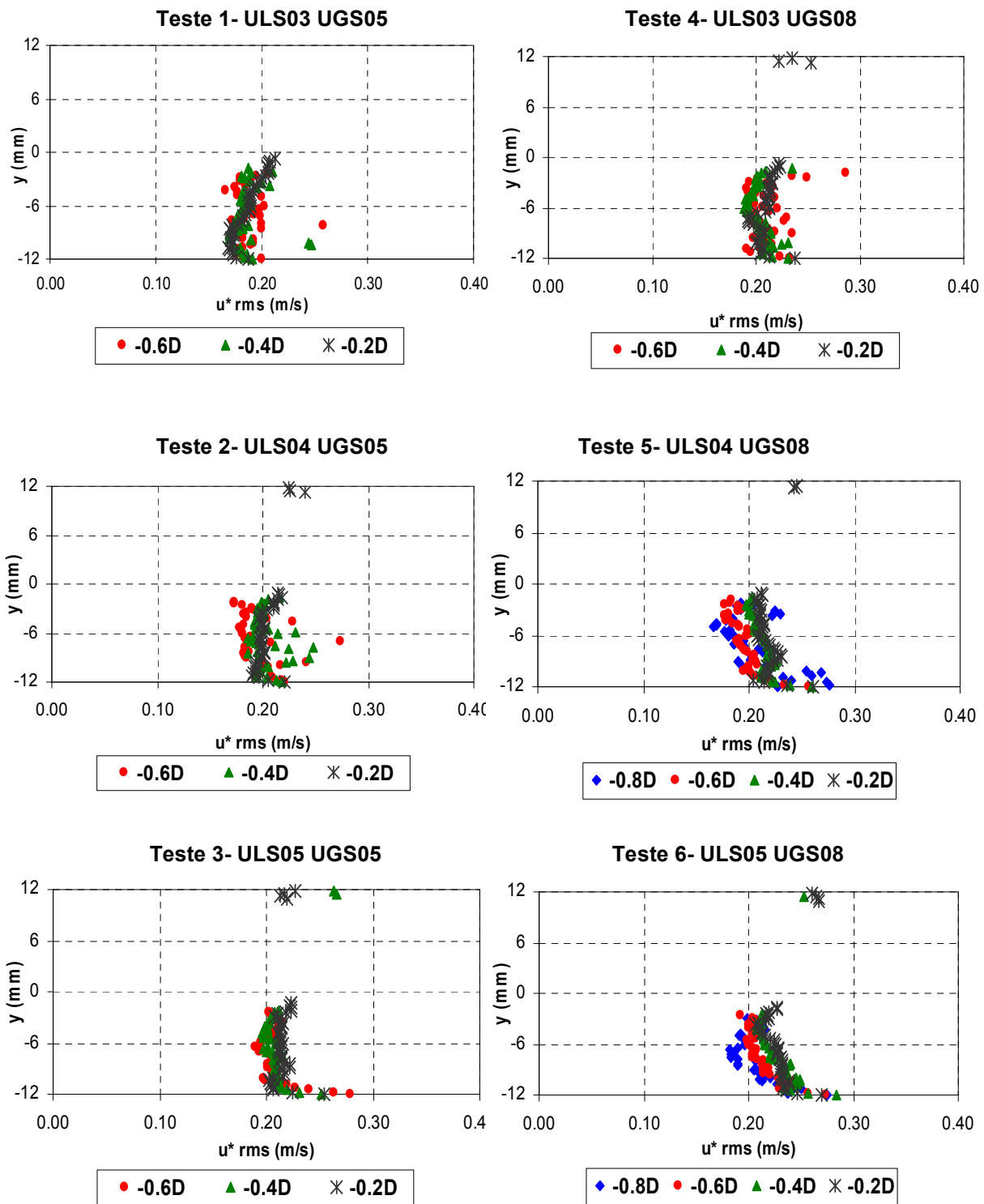


Figura 6.44 – Flutuação da velocidade na região do filme de líquido para escoamento horizontal.

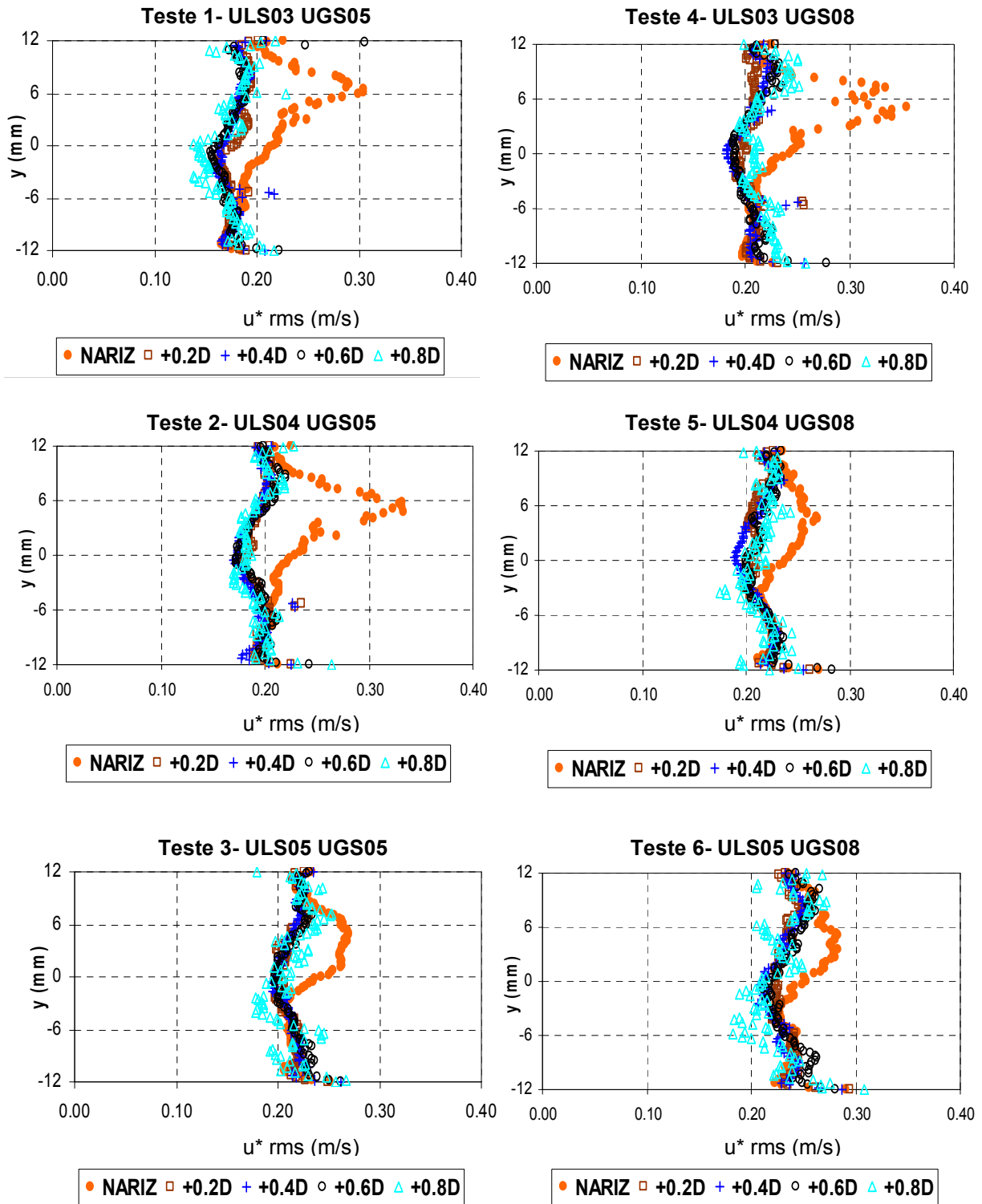


Figura 6.45 – Flutuação da velocidade na região do pistão de líquido para escoamento horizontal.

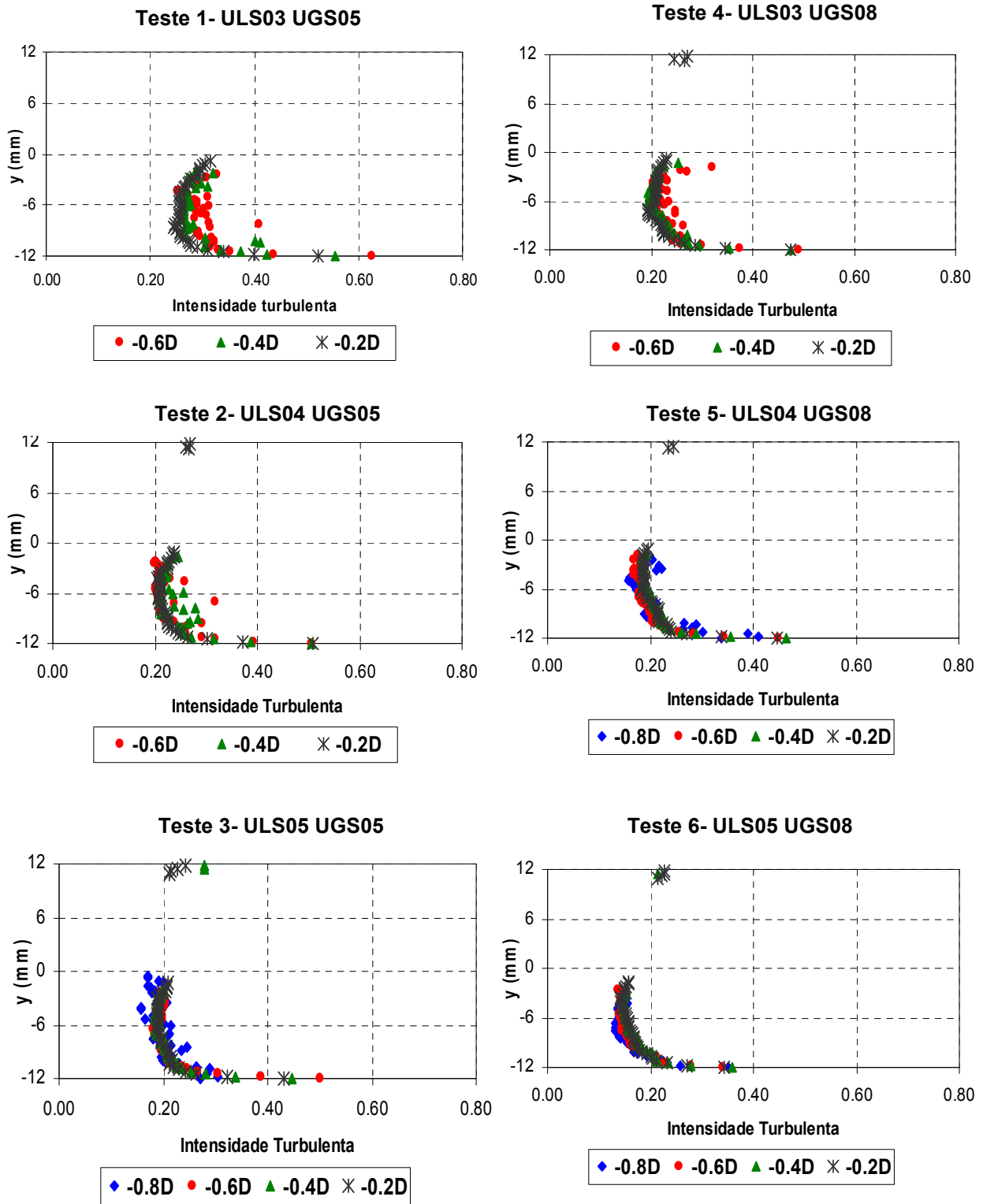


Figura 6.46 – Intensidade Turbulenta na região do filme de líquido para escoamento horizontal.

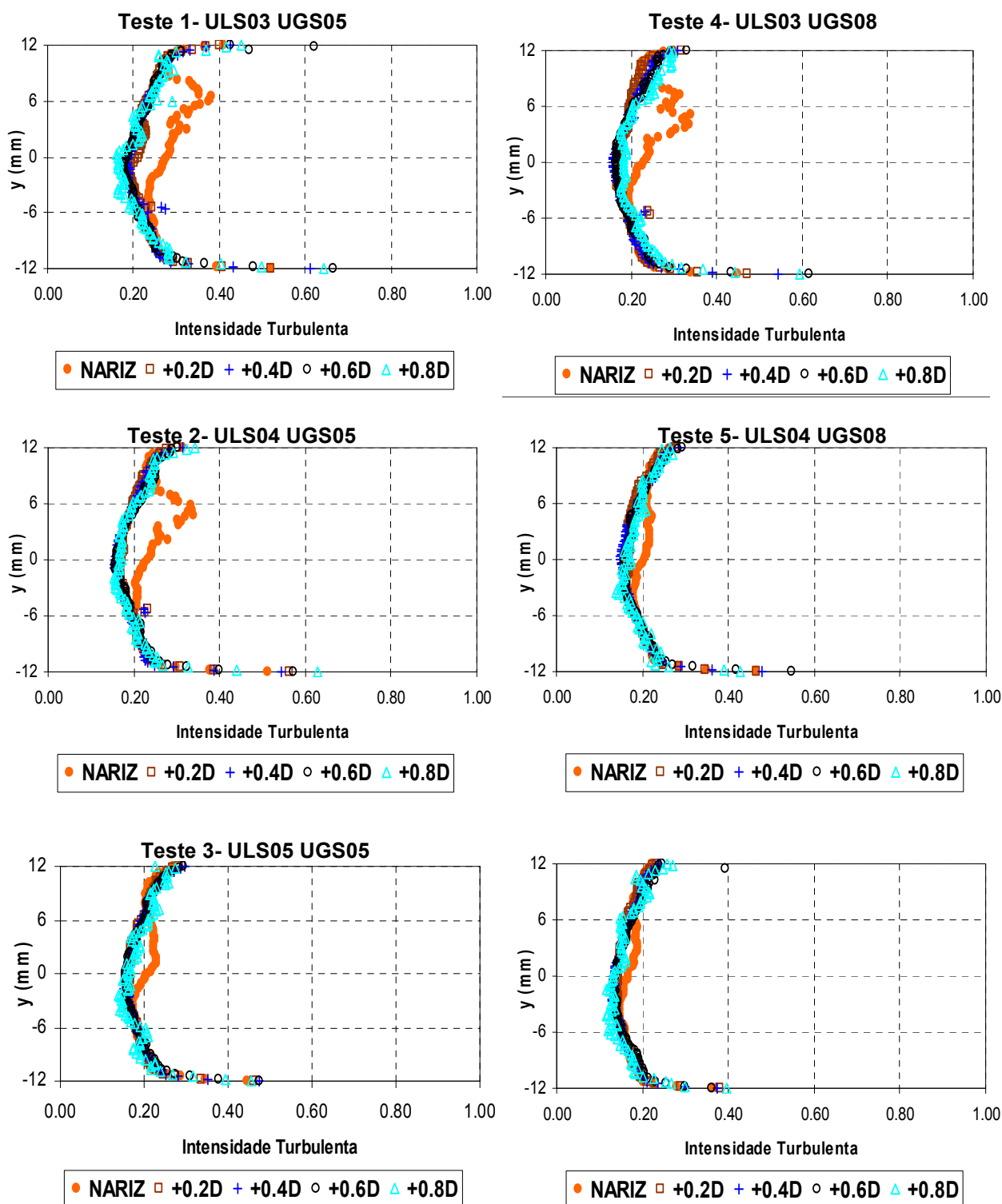


Figura 6.47 – Intensidade Turbulenta na região do pistão de líquido para escoamento horizontal.