5
Resultados

A metodologia apresentada nos Capítulos 3 e 4 foi utilizada para prever o escoamento no padrão de golfada de uma célula unitária. Dois conjuntos de casos foram analisados. O primeiro conjunto teve por objetivo analisar a forma do nariz e da cauda de uma bolha alongada, comparando com os dados experimentais de Fagundes Netto et al (1999a). Já com o segundo conjunto foi possível analisar com detalhes o campo de velocidade, comparando com os resultados experimentais de Fonseca (2009). Antes de investigar o escoamento no padrão de golfada, um padrão mais simples, o padrão estratificado, foi investigado, de forma a verificar o desempenho do Modelo VOF. Neste caso, selecionou-se um caso líquido/líquido, e determinou-se o desenvolvimento do escoamento ao longo de uma tubulação até atingir o regime estratificado estável. A mesma configuração de tubulação e as mesmas propriedades dos fluidos empregados por Elseth (2002) foram utilizados. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, com boa concordância para a queda de pressão total. Eles podem ser analisados no artigo titulado "Computacional Analysis on Stratified Two-Phase Oil/Water Co-Current Flow in Horizontal Pipes" apresentado no COBEM 2009.

A seguir são analisados os casos de escoamento horizontal no padrão de golfada ar/água. Em todos os casos analisados, o procedimento proposto por Ujang et al (2008) para prever uma golfada unitária foi empregado.

5.1
Comparação com Fagundes Netto et al. (1999a)

Visando realizar uma análise da forma do nariz e da cauda da bolha alongada, empregaram-se as mesmas condições de dois casos apresentados no trabalho de Fagundes Netto et al. (1999a), sendo a tubulação com mesmo diâmetro igual a 0,053m. As propriedades do ar e água encontram-se na Tabela 5.1, enquanto que as condições iniciais do escoamento encontram-se na Tabela 5.2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

De acordo com observações experimentais (Dukler e Hubbard, 1975 e Fabre e Liné, 1992), o comprimento médio das golfadas L_s situa-se entre os valores $15D$ e $40D$. Visando garantir a obtenção da golfada no interior do domínio computacional, o comprimento do mesmo foi definido com sendo igual a 4,6 m, o que corresponde a aproximadamente o dobro do comprimento máximo da golfada, dessa forma pode-se garantir que as condições de entrada e saída do domínio computacional não afetam o escoamento na região da bolha.

Tabela 5.1- Propriedades dos Fluidos

Fluido	ρ (kg/m^3)	μ (Pa-s)	σ (N/m)
Ar	1,225	$1{,}790\times10^{-5}$	0,073
Água	998,2	$1{,}003\times10^{-3}$	

Tabela 5.2- Condições Experimentais de Operação (Fagundes Netto, 1999a)

Casos	W_m (m/s)	Fr_c	W_T (m/s)	W_{wall} (m/s)	W_{inlet} (m/s)
A	0,6	0,832	0,892	– 0,892	– 0.292
B	1,8	2,496	2,152	– 2,152	– 0.352

De forma a ser possível analisar tanto o nariz como a cauda da bolha, o domínio computacional foi inicializado de forma distinta ao descrito no Capítulo 4. Nestes casos, definiu-se inicialmente uma bolha isolada num tubo cheio de água. A condição na saída no caso de reversão foi zero para a fase gasosa. A Figura 5.1 ilustra a distribuição de fração volumétrica utilizada na inicialização do problema:

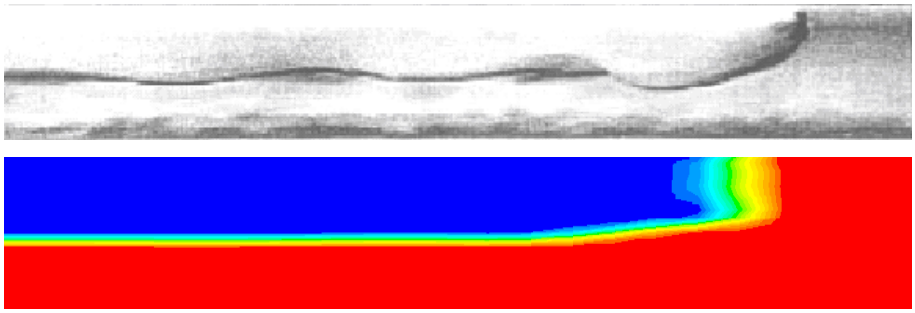
Figura 5.1- Esquema da inicialização para os casos de Fagundes Netto et al. (1999a).

Os contornos de fração volumétrica para o nariz e a cauda da bolha são apresentados nas Fig. 5.2 e Fig. 5.3, respectivamente. As figuras superiores correspondem as visualizações apresentadas por Fagundes Netto et al (1999a), enquanto que as figuras inferiores correspondem aos dados obtidos no presente trabalho. Estes perfis correspondem ao plano central da tubulação.

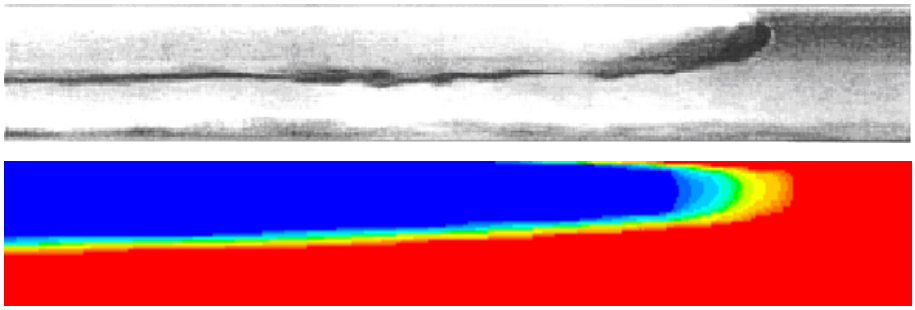
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

A Fig. 5.2(a) corresponde ao Caso A, enquanto que a Fig. 5.2(b) corresponde ao Caso B. Observa-se que para ambos os casos, os resultados qualitativos obtidos são bem semelhantes aos observados experimentalmente. Não só a espessura do filme embaixo da bolha é aproximadamente igual, como a forma do nariz da bolha é bem semelhante.

Examinando a Fig. 5.2(a), nota-se que o líquido não molha a parte superior da tubulação na altura do nariz da bolha, tanto no caso experimental como no numérico, fenômeno normalmente observado para baixas velocidades de mistura como é o Caso A. Observa-se ainda, que no Caso B, o qual apresenta vazão maior que o Caso A, Fig. 5.2(b), o líquido molha o tubo acima do nariz da bolha, o que será definido como "penetração axial".



a) Caso A



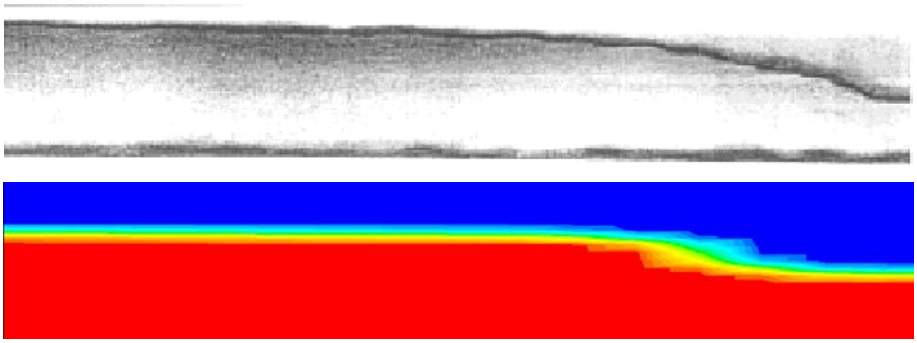
b) Caso B

Figura 5.2- Forma do nariz da bolha. Experimental (Fagundes Netto, 1999a) e numérico.

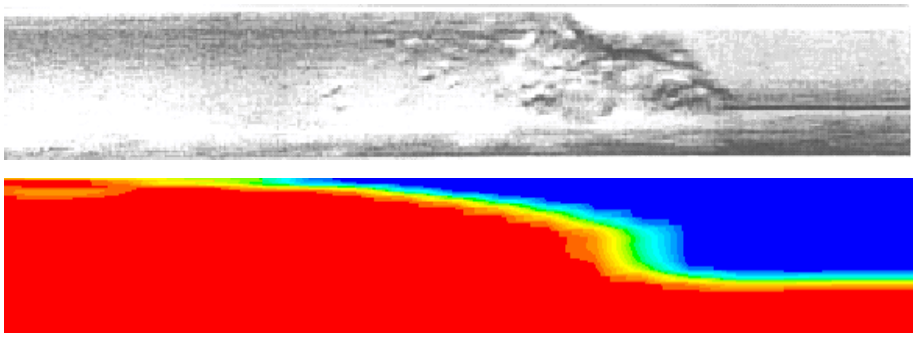
A Fig. 5.3 apresenta as caudas da bolha para os Casos A e B. Novamente pode-se observar a semelhança qualitativa entre os perfis, com uma pequena deterioração em relação à qualidade do perfil obtido para o nariz da bolha. Para o Caso A, Fig. 5.3(a) observa-se um filme de gás na parte superior após a bolha, o qual é superestimado numericamente. A transição do filme líquido para a golfada líquida é suave e longa conforme as observações de Fagundes Netto et al. (1999a).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

Nota-se ainda pelos dados experimentais, que na medida em que a vazão aumenta, a cauda começa a transferir bolhas de ar para a golfada líquida que viaja atrás da bolha, Fig. 5.3(b). Esta transferência não é observada na modelagem numérica, devido possivelmente ao fato da malha não ser fina o suficiente para capturar as bolhas com o modelo VOF. Contudo, observa-se uma região de mistura, com uma configuração semelhante à observada experimentalmente. A transição do filme líquido para a golfada líquida no Caso B é curta, o líquido fecha logo a tubulação.



a) Caso A



b) Caso B

Figura 5.3- Forma da cauda da bolha. Experimental (Fagundes Netto, 1999) e numérico.

Ujang et al. (2008) observaram nos resultados de simulações visando prever trens de golfadas múltiplas, que a transferência de bolhas de ar através da golfada líquida era diminuída e substituída por uma transferência ao longo de um filme gasoso no topo da tubulação. Este fenômeno provavelmente é causado pelo algoritmo de captura da interface que suaviza o formato da golfada líquida e não permite a assimilação de gás dentro da mesma. Esta ocorrência também foi observada no presente trabalho, como ilustrado na Fig. 5.4, a qual apresenta uma golfada inteira, sendo que um fator de escala axial igual a 0,2 foi utilizado para permitir observar detalhes da golfada. Este resultado corresponde a uma

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

velocidade de mistura igual W_m = 1,304 m/s. Devido a esta deficiência na modelagem da cauda da golfada, ênfase foi dada no presente trabalho a determinação do nariz da bolha, considerando-se somente uma bolha alongada e a golfada líquida a montante dela, conforme explicado no Capítulo 4, e ilustrado na Fig. 5.5.

A ocorrência do filme gasoso dificulta a tomada de dados da golfada líquida, resultando em perfis de velocidades que não refletem o fenômeno real. Acredita-se que em trabalhos posteriores, o uso de uma malha com maior refinamento na zona da golfada líquida permitiria a advecção mais eficiente de gás dentro da golfada.

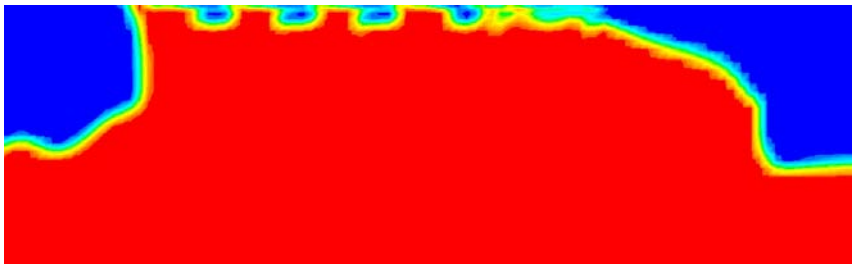


Figura 5.4- Fração volumétrica na golfada líquida.

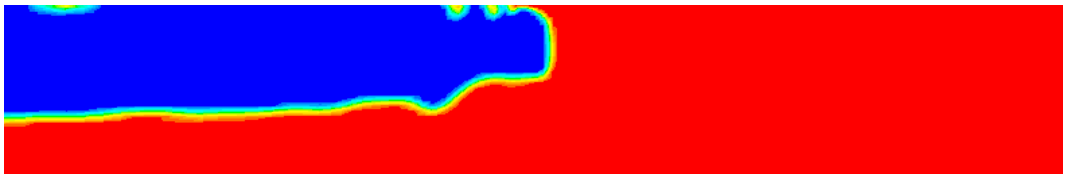


Figura 5.5- Exemplo de análise realizada.

5.2
Comparação com Fonseca (2009)

Nesta seção, o segundo conjunto de casos simulados é analisado, apresentando uma comparação detalhada entre os dados obtidos e os dados experimentais medidos por Fonseca (2009).

Os dados experimentais de Fonseca (2009) foram obtidos utilizando a técnica de PIV (*Particle imaging velocimetry*), que é uma técnica óptica de obtenção de dados do campo instantâneo de velocidades em escoamentos. Um esquema da instalação utilizada por Fonseca (2009) encontra-se ilustrado na Fig. 5.6. A técnica utiliza as imagens produzidas no escoamento pela iluminação por um feixe laser em pequenas partículas traçadoras em suspensão no escoamento,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

não utilizando nenhum tipo de ação mecânica. As imagens são registradas em quadros sucessivos de um arquivo digital cujo pós–processamento conduz à obtenção do deslocamento das partículas na unidade de tempo. Os testes foram realizados numa tubulação de 0.024 metros de diâmetro e um comprimento de 10 metros (≈ 400 D).

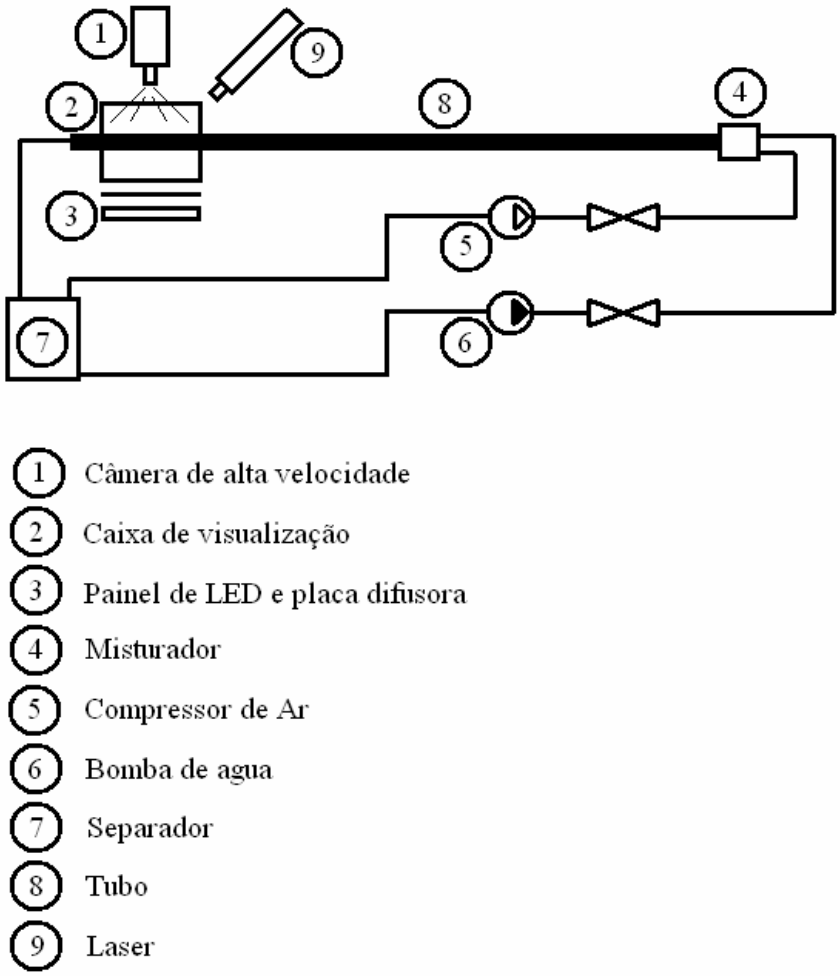


Figura 5.6- Esquema da instalação experimental. Fonseca (2009).

Como nos casos anteriores, Fonseca (2009) também realizou seus experimentos com ar e água, cujas propriedades encontram-se na Tab. 5.1.

Seis casos medidos por Fonseca (2009) foram selecionados para serem analisados. As condições de operação do escoamento, correspondente a cada caso encontram-se na Tab. 5.3. Nesta tabela, Q_l e Q_g são as vazões volumétricas do líquido e do gás e Re_m é o número de Reynolds baseado na velocidade e propriedades da mistura. De acordo com o trabalho de Fonseca (2009), as propriedades de mistura são ponderadas pela fração volumétrica, C_w. As relações

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

para determinar essas variáveis encontram-se a seguir

$$\mathrm{Re}_m = \frac{\rho_m W_m D}{\mu_m} \tag{5.1}$$

$$W_m = w_{sl} + w_{sg} \quad ; \quad w_{sl} = \frac{Q_l}{A} \quad ; \quad w_{sg} = \frac{Q_g}{A} \tag{5.2}$$

$$\rho_m = \rho_l C_w + \rho_g (1 - C_w) \quad ; \quad \mu_m = \mu_l C_w + \mu_g (1 - C_w) \tag{5.3}$$

onde

$$C_w = \frac{Q_l}{Q_l + Q_g} \tag{5.4}$$

sendo ρ_l, μ_l e ρ_g, μ_g a densidade e a viscosidade para o líquido e o gás, respectivamente.

Tabela 5.3- Condições Experimentais de Operação (Fonseca, 2009)

Casos	Q_g (m^3/s)	Q_l (m^3/s)	W_m (m/s)	w_{sg} (m/s)	w_{sl} (m/s)	Re_m	w_{sg}/w_{sl}
1	$2{,}2\times10^{-4}$	$1{,}3\times10^{-4}$	0,770	0,475	0,295	17912	1,610
2	$2{,}2\times10^{-4}$	$1{,}8\times10^{-4}$	0,868	0,475	0,393	20330	1,209
3	$2{,}2\times10^{-4}$	$2{,}3\times10^{-4}$	0,991	0,475	0,516	23314	0,921
4	$3{,}6\times10^{-4}$	$1{,}3\times10^{-4}$	1,083	0,788	0,295	24773	2,671
5	$3{,}6\times10^{-4}$	$1{,}8\times10^{-4}$	1,181	0,788	0,393	27309	2,005
6	$3{,}6\times10^{-4}$	$2{,}3\times10^{-4}$	1,304	0,788	0,516	30380	1,527

A partir das informações das Tabela 5.1 e Tabela 5.3, e das relações descritas na seção 3.3, podemos determinar as condições de contorno para todos os casos, as quais são apresentadas na Tabela 5.4. Como descrito no Capítulo 3, utilizou-se a correlação de Bendiksen (1984) para estimar a velocidade inicial de translação da bolha W_T. Uma vez que o número de Froude de todos os casos é inferior a 3,5, especificou-se C_o =1,05 e C_l=0,54. A velocidade de deslizamento para o diâmetro da tubulação empregado nos testes é W_{drift}=0,26 m/s.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

O sinal negativo nos valores da velocidade na parede, W_{wall} e a velocidade na entrada, W_{inlet}, referem-se ao sentido da velocidade, levando-se em conta que o domínio computacional utilizado tem o eixo *z* como eixo axial, e estas velocidades são orientadas no sentido negativo do eixo *z*.

Tabela 5.4- Condições Numéricas de Operação

Casos	Fr_c	W_T (m/s)	W_{wall} (m/s)	W_{inlet} (m/s)
1	0,61	1,071	-1,071	-0,301
2	0,81	1,174	-1,174	-0,305
3	1,06	1,303	-1,303	-0,312
4	0,61	1,399	-1,399	-0,316
5	0,81	1,502	-1,502	-0,321
6	1,06	1,631	-1,631	-0,327

Antes de apresentar os resultados é interessante localizá-los em um mapa de padrão de escoamento. Para alcançar este objetivo, desenvolveu-se um programa no MATLAB™ para determinar os mapas de arranjos de fases para água e ar, baseado nos trabalhos de Taitel e Dukler (1976), Barnea (1986) e Chen et al. (1997), para a geometria e as propriedades dos testes experimentais disponíveis. Os detalhes da formulação utilizada no programa encontram-se no Apêndice B.

A Figura 5.7 apresenta o mapa de arranjos de fases determinados numericamente neste trabalho. Neste mapa, os seis casos testados são indicados com o símbolo ■. Pode-se notar que todos os casos analisados caíram na faixa de regime intermitente, que vai desde bolha alongada até golfadas. Visando corroborar a qualidade dos modelos utilizados para gerar o mapa de padrão de escoamento, os casos testados, também foram localizados no mapa de padrões (Fig. 5.8) determinado experimentalmente por Mandhane et al.(1974), para os mesmos fluidos em uma tubulação horizontal com 0,0254 m de diâmetro, praticamente o mesmo diâmetro que utilizado neste trabalho. Comparando os dois mapas, observa-se que com exceção da transição para bolha dispersa, os dois mapas são bem semelhantes. Nota-se ainda que os casos investigados também se encontram na região de transição entre bolha alongada e golfada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

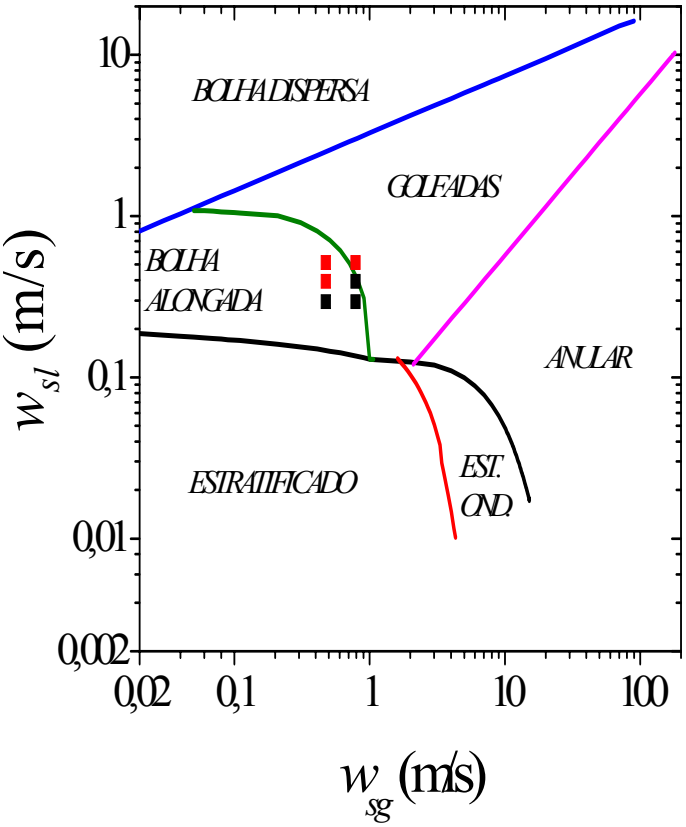


Figura 5.7-Mapa de arranjos de fases

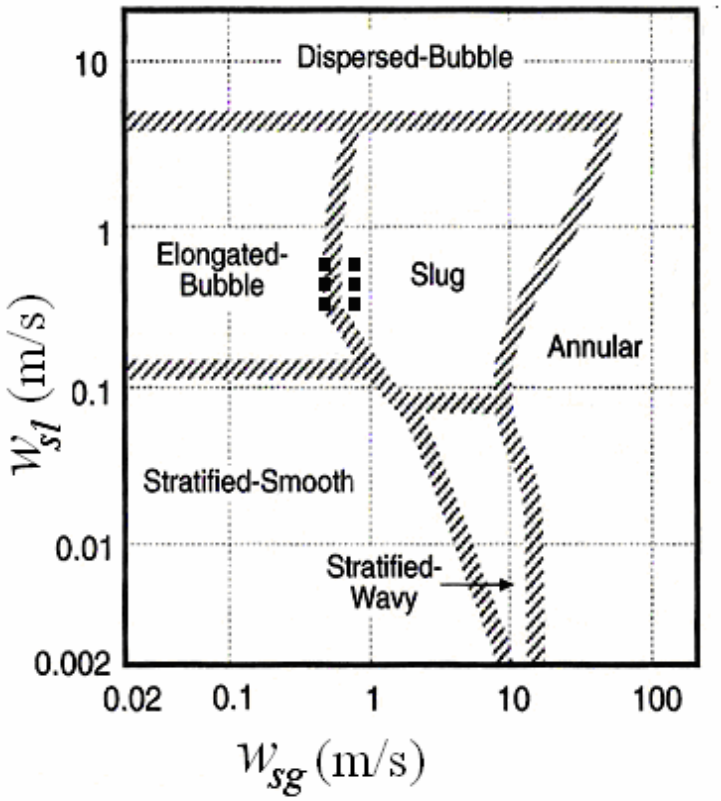


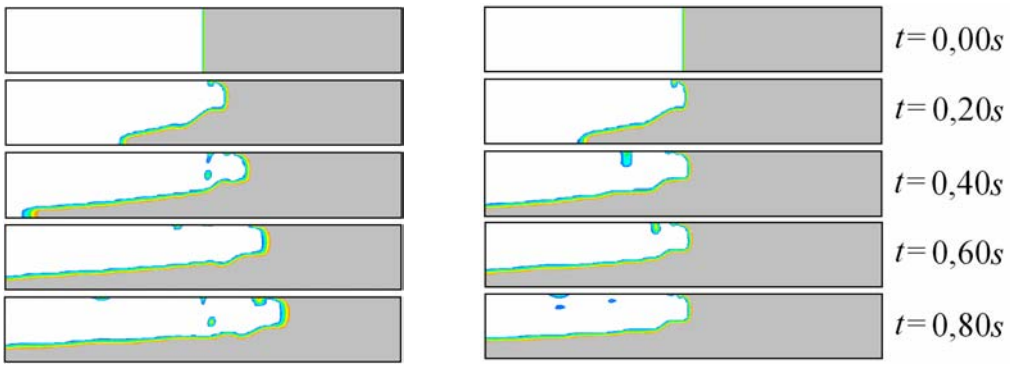
Figura 5.8- Mapa de arranjos de fases, Mandhane et al. (1974)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

5.2.1
Velocidade de Translação da Bolha

Para a previsão da golfada unitária, é necessário prescrever a velocidade da parede exatamente igual à velocidade de translação da bolha, a qual depende do campo de escoamento. Nesta seção ilustra-se o procedimento utilizado para corrigir a estimativa inicial da velocidade de translação, a qual foi baseada na correlação de Bendiksen (1984).

Inicialmente o escoamento foi simulado com condições de contorno baseadas na velocidade da bolha teórica, W_T (Tab. 5.4). Cada simulação consistiu de 5 segundos para cada teste. A Figura 5.9 apresenta os campos de fração volumétrica a cada 0,2s segundos de simulação, onde a cor cinza representa a fase líquida e a cor branca representa a fase gasosa. Como pode ser observado na Fig. 5.9(a), a bolha se desloca para a entrada da tubulação, pois apesar da velocidade teórica, W_T (Nicklin, 1962) ser uma boa aproximação, esta precisa ser corrigida. A Fig. 5.9(b) ilustra os mesmos resultados, porém empregando a velocidade correta de translação da bolha W_T^*, onde pode-se notar que a bolha permaneceu na mesma posição ao longo do tempo. A velocidade correta de translação da bolha W_T^* pode ser obtida a partir da identificação da localização do nariz da bolha e da determinação de seu deslocamento ao longo da tubulação.



a) Velocidade teórica, $W_{wall} = -W_T$ b) Com velocidade corrigida, $W_{wall} = -W_T^*$

Figura 5.9- Contorno de Fração volumétrica em distintos tempos.

A tarefa de medir a velocidade de deslocamento da bolha foi realizada com um código programado em MATLAB™. Este código lê os campos de fração volumétrica para cada instante de tempo, e procura ao longo do eixo *z*, começando

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

do lado da entrada (direita no gráfico), o primeiro valor na seção transversal do duto menor do que 1, que é quando ocorre uma troca de fases. Uma vez encontrados os diversos pontos ao longo do eixo vertical com esta condição, pode-se comparar sua coordenada axial e assim determinar em que ponto se encontra o nariz. Uma vez conhecida a coordenada axial do nariz ao longo do tempo, achar a velocidade neste ponto é trivial, a qual é então utilizada para corrigir a velocidade de translação da bolha. Se na simulação seguinte a bolha ainda estiver se deslocando, a velocidade de translação é corrigida novamente, servindo como novo dado de entrada para calcular a velocidade na entrada W_{inlet} e da parede W_{wall}. A Tab. 5.5 apresenta a comparação entre as velocidades teóricas da bolha alongada W_T e a velocidade de translação da bolha determinada numericamente W_T^*. Note que a diferença máxima obtida entre as duas estimativas foi de 10,7%; e que esta diferença cai com o aumento da velocidade de mistura.

Tabela 5.5 Velocidade da bolha teórica (correlação) e numérica

Casos	W_m (m/s)	W_T (m/s)	W_T^* (m/s)	*Erro* (%)	z_p/D	y_p/D
1	0,770	1,071	0,956	10,7	1,211	0,200
2	0,868	1,174	1,067	9,12	1,494	0,206
3	0,991	1,303	1,205	7,52	1,220	0,213
4	1,083	1,399	1,308	6,55	1,386	0,219
5	1,181	1,502	1,416	5,74	3,092	0,219
6	1,304	1,631	1,552	4,84	2,734	0,250

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

5.2.2
Perfil do Nariz da Bolha

A forma do perfil do nariz da bolha pode ser avaliada através da penetração axial z_p e radial y_p da bolha na cauda da golfada líquida, medidos como o indicado na Fig. 5.10. Estes resultados adimensionais são apresentados na Tab. 5.5.

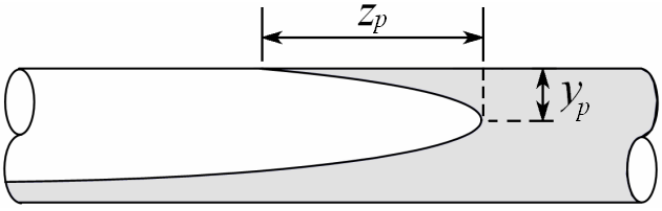
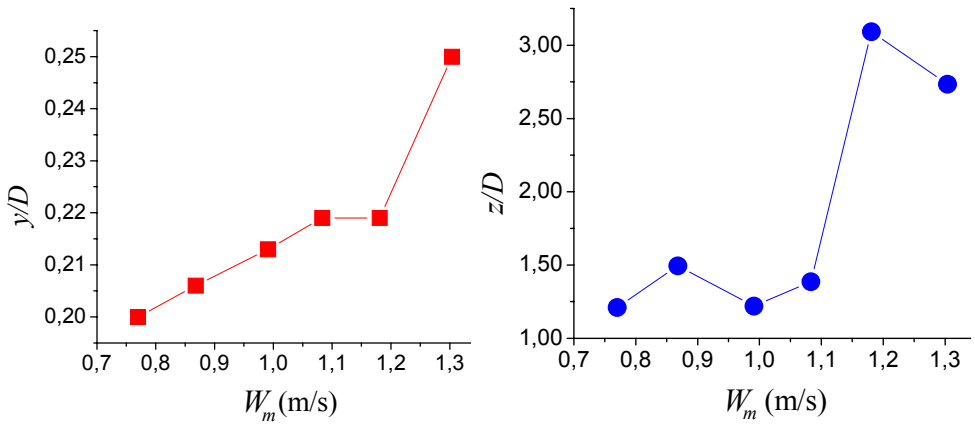


Figura 5.10- Diagrama de penetração axial e radial da bolha alongada

Para melhor avaliar o perfil do nariz da bolha, as penetrações axiais e radiais são apresentadas graficamente em função da velocidade de mistura nas Fig. 5.11(a) e Fig. 5.11(b), respectivamente. Observa-se na Fig. 5.11(a) o crescimento da penetração radial com o incremento da velocidade de mistura, o que é um fenômeno observado experimentalmente (Bendiksen, 1984, Rosa et al., 2004), com o nariz da bolha tendendo a se orientar em direção ao centro da tubulação, com o aumento da velocidade de mistura. Nota-se que a variação de y_p com a velocidade de mistura é pequena, mas a variação de W_m também foi pequena. Para melhor visualizar o efeito da velocidade de mistura na penetração, a Fig. 5.12, apresenta uma comparação entre os perfis das bolhas para os Casos 1 e 6, que são aqueles com a menor e maior velocidade de mistura. Pode-se observar a tendência do aumento da penetração radial com o aumento da velocidade de mistura apresenta a tendência correta. Vale mencionar que esta comparação foi realizada com o uso da malha 3 para oferecer uma melhor resolução do nariz da bolha.



a) Penetração radial b) Penetração axial

Figura 5.11- Penetração axial e radial

A Figura 5.11(b) também ilustra um aumento da penetração axial com o aumento da velocidade de mistura, porém o incremento é mais suave para baixas velocidades de mistura. Os Casos 2 e 5 apresentam um valor de penetração axial que se desvia da tendência geral. Isto pode ser devido ao fato de que pequenas gotas se desprenderam no topo da tubulação, dificultando a discriminação do verdadeiro contato do fluido com a parede superior pelo algoritmo desenvolvido para a identificação de z_p.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

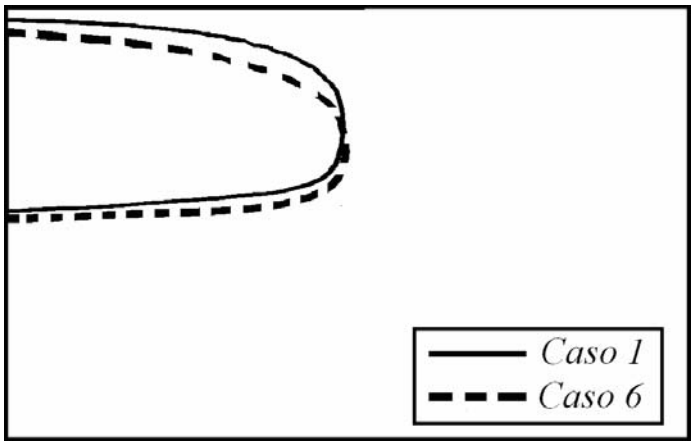


Figura 5.12- Comparação da penetração radial da bolha

5.2.3
Vetores Velocidade

Para ser possível realizar a comparação do campo de velocidade numérico com os dados experimentais, alterou-se o referencial no qual os dados numéricos foram obtidos (referencial da bolha) para o referencial do laboratório, somando-se ao campo de velocidade o valor da velocidade da parede.

Nesta seção selecionou-se somente os Casos 1 e 6 para serem analisados, por serem os casos com menor e maior vazão, respectivamente.

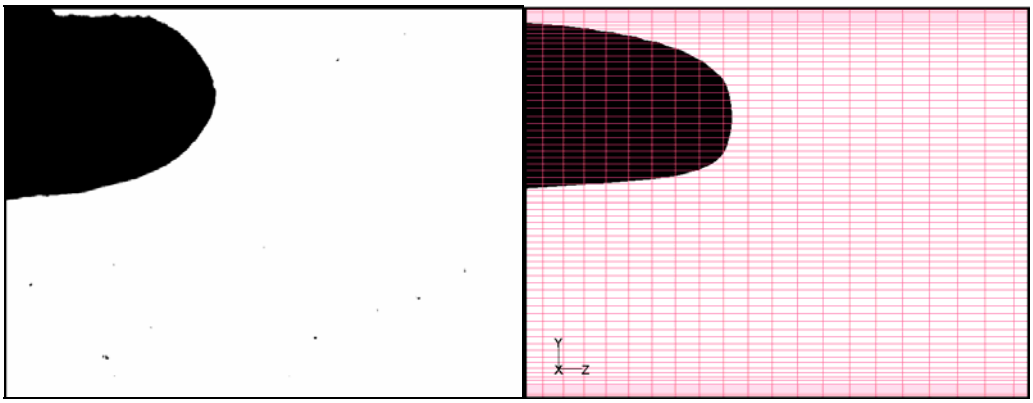
Na Fig. 5.13, apresenta-se a malha junto com os contornos de fração volumétrica. Nesta figura pode-se ver, com auxílio da malha, o incremento tanto da penetração axial tanto como da penetração radial como o aumento da velocidade superficial de mistura. Dito aumento não tão significativo como o mostrado pelos dados experimentais.

A Figura 5.14 apresenta a comparação entre os campos de velocidade experimental e numérico para os Casos 1 e 6, na região de líquido. Nestas figuras, os vetores são formados com somente os componentes de velocidade do plano, e os valores máximos estão representados com cor vermelha e os mínimos com a cor azul, passando pelo amarelo e verde. Nota-se que, tanto os dados experimentais como numéricos, apresentam velocidades máximas na frente e abaixo do nariz da bolha.

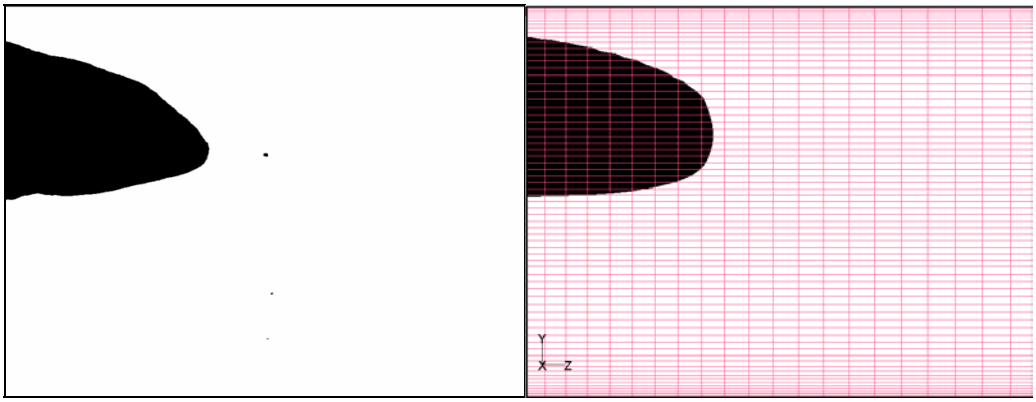
Analisando o campo de velocidade experimental referente ao Caso 6 (Fig. 5.14b), observa-se que devido ao incremento na velocidade de mistura, como o nariz da bolha se orienta para o centro da tubulação, as velocidades máximas são

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

deslocadas para a parte inferior da tubulação, porém este comportamento não é apreciado nos campos numéricos.



a) Caso 1 - Experimental b) Caso 1 – Numérico



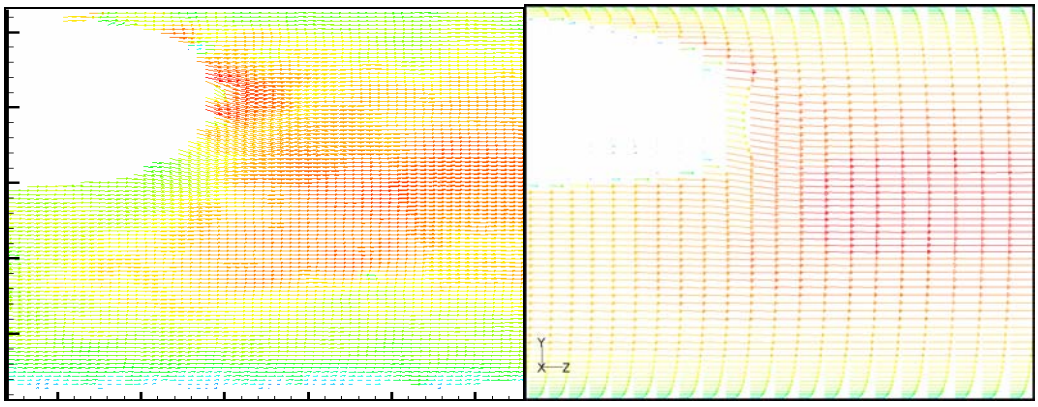
c) Caso 6 - Experimental d) Caso 6 – Numérico

Figura 5.13- Comparação da fração volumétrica

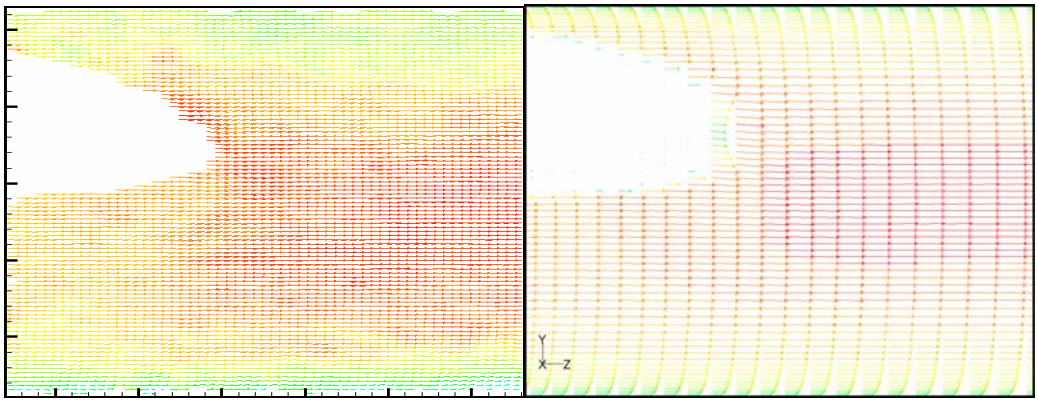
Para verificar este fenômeno, os perfis numérico e experimental correspondente aos Casos 1 e 6, da componente axial da velocidade numa linha vertical no centro da tubulação, a uma distância na direção z igual a $+0{,}8D$ a montante do nariz da bolha são apresentados na Fig. 5.15. Para melhor apreciar estes perfis, nestes gráficos foi incluído o perfil turbulento empírico ou "lei 1/7":

$$\frac{W}{W_{\max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7} \tag{5.5}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA



a) Caso 1 - Experimental b) Caso 1 – Numérico

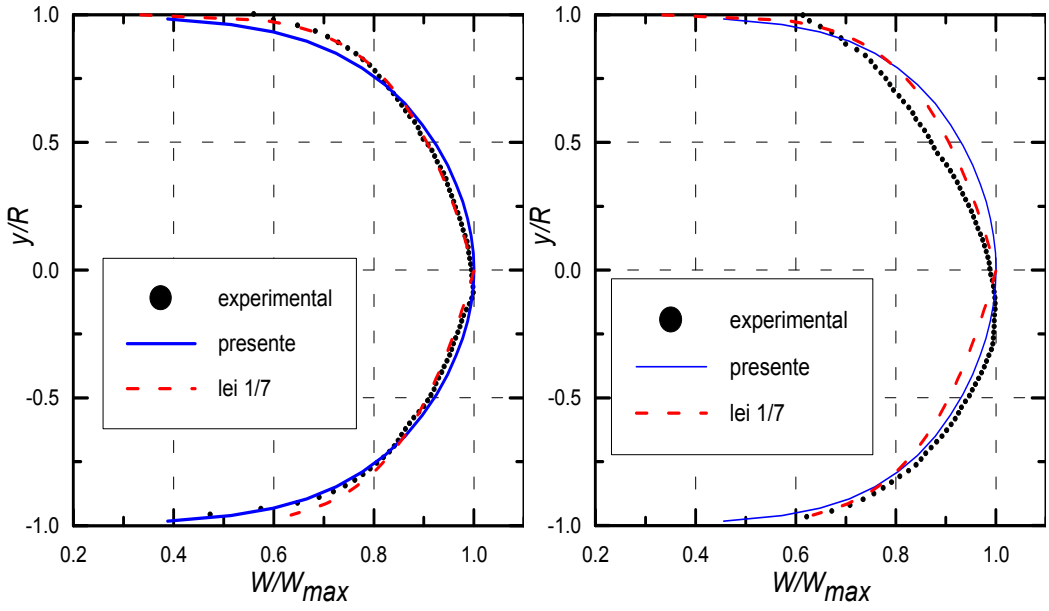


c) Caso 6 - Experimental d) Caso 6 – Numérico

Figura 5.14- Comparação dos campos de velocidade

Analisando os perfis da Fig. 5.15(a), nota-se para o Caso 1 (baixa velocidade de mistura), uma excelente concordância entre os perfis de velocidade axial, numérica e experimental. Observa-se ainda que estes perfis são muito próximos da "lei de 1/7", concordando com observação de Taitel e Barnea (1990), de que dentro de uma golfada líquida estável e longa o suficiente é produzido um perfil de velocidade desenvolvido na sua cauda. No entanto, observa-se na Fig. 5.15(b), que no Caso 6 (maior velocidade de mistura), o ponto de velocidade máxima encontra-se deslocado para baixo, devido ao deslocamento do nariz da bolha para baixo. Este deslocamento não é observado nos dados numéricos, que continuam muito próximos do perfil da "lei de 1/7".

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA



a) Caso 1 b) Caso 6

Figura 5.15- Comparação do perfil de velocidades na golfada líquida

Visando complementar as informações referentes ao campo de velocidade, é interessante analisar os vetores velocidade no plano transversal de escoamento. Porém, para melhor interpretar os dados é conveniente primeiro, analisar os contornos da fração volumétrica, de forma a avaliar o formato da bolha, identificando as regiões de gás e de líquido. A Figura 5.16, apresenta para o Caso 1, a fração volumétrica nas seguintes secções transversais da bolha alongada: coordenadas axiais 0,0D (nariz), -0,2D, -0,4D e -0,8D.

Analisando os contornos de fração volumétrica na Fig. 5.16 nas secções transversais começando pelo nariz, Fig. 5.16(a), pode-se visualizar a forma da bolha em azul, sendo a água vermelha. A bolha apresenta uma seção transversal ovalada próxima ao nariz, a qual vai se achatando ao longo de seu corpo. Nota-se ainda que a bolha se desloca para a parte superior da tubulação. Pode-se observar que o filme líquido acima da bolha desaparece na coordenada -0,8D. A distância entre o nariz da bolha até a posição onde o filme desaparece corresponde a "penetração axial", z_p.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

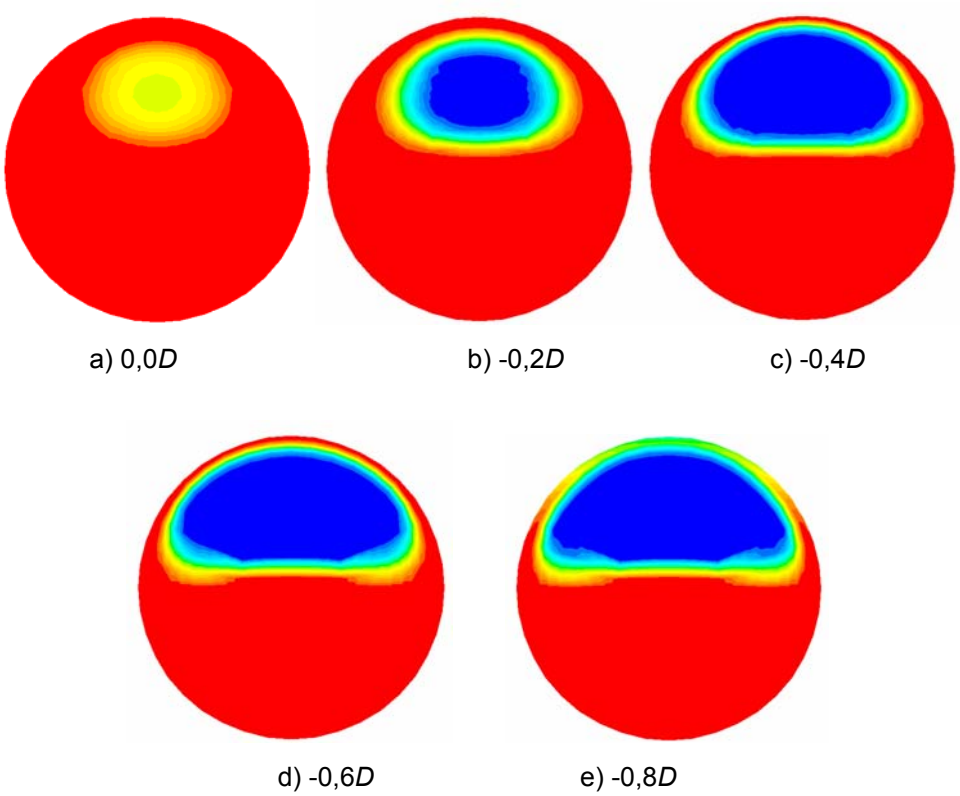
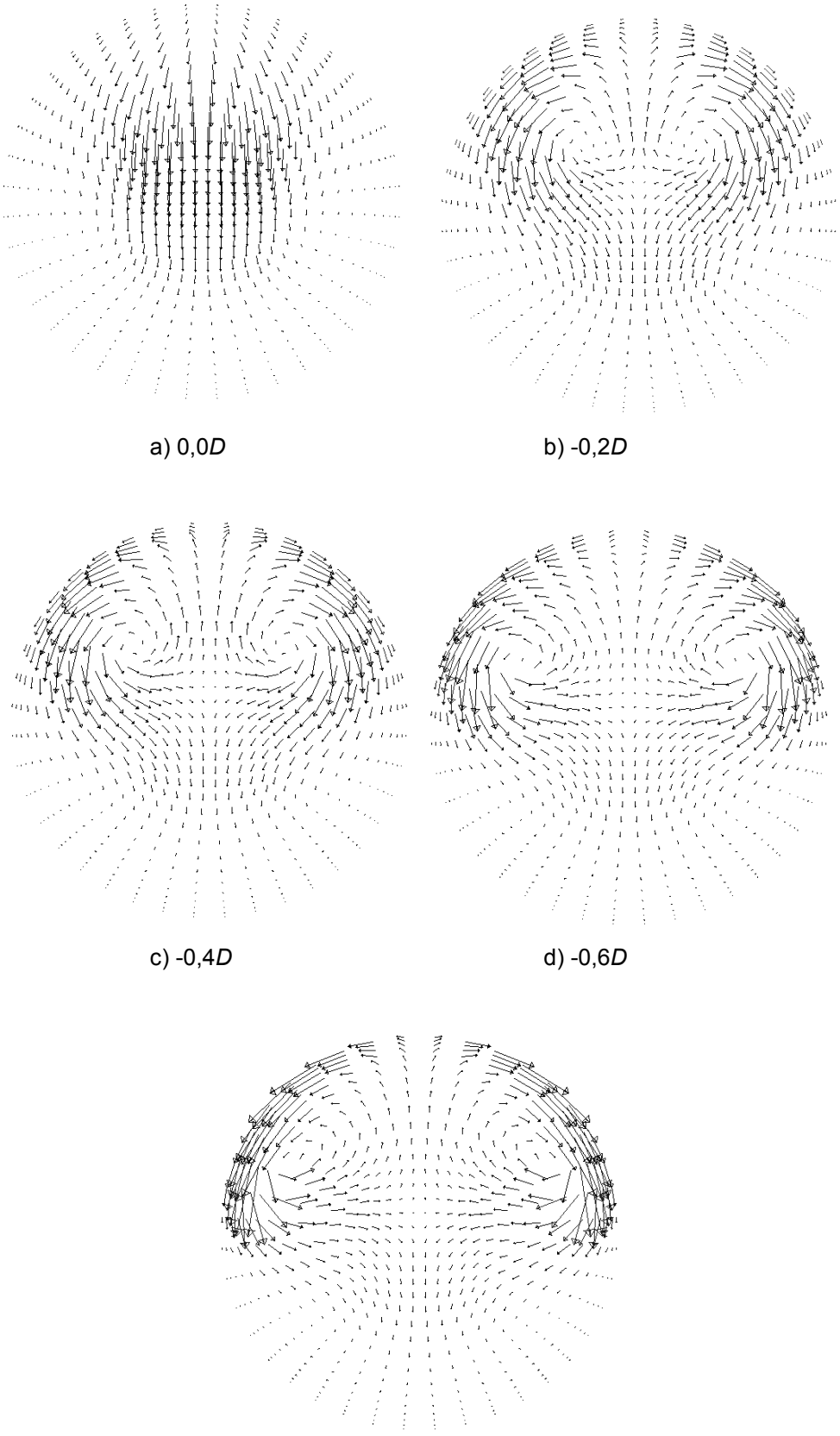


Figura 5.16- Contornos da fração volumétrica em diversas secções transversais. Caso 1

A Figura 5.17 apresenta os vetores velocidades formados pelos componentes dos planos transversais, nas mesmas coordenadas onde os contornos de fração volumétrica foram apresentados. Em $z = 0$, o campo de velocidade corresponde ao líquido, onde observa-se que o líquido é direcionado para baixo, para contornar a bolha. Nas outras seções transversais, observa-se claramente dois vórtices no interior da bolha, girando em sentidos opostos, com intensidade bem superior a velocidade no líquido. Nota-se ainda o deslocamento dos vórtices para baixo ao longo do corpo da bolha. Observa-se que o escoamento na fase liquida (parte inferior da tubulação) é quase que puramente axial, com baixíssimas velocidades. Para observar se este efeito é causado pela proximidade do nariz da bolha, examina-se na Fig. 5.18, os vetores velocidade em uma coordenada bem afastada do nariz (-5*D*). Nota-se que efetivamente o efeito de recirculação continua na fase gasosa, começando no centro da tubulação e retornando pela parede. Os resultados podem ser vistos na Fig. 5.18(a). A Fig. 5.18(b) apresenta o contorno da fração volumétrica, onde pode-se observar que longe do nariz da bolha, a região da seção transversal ocupada pela bolha é bem maior e a interface é quase plana.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA



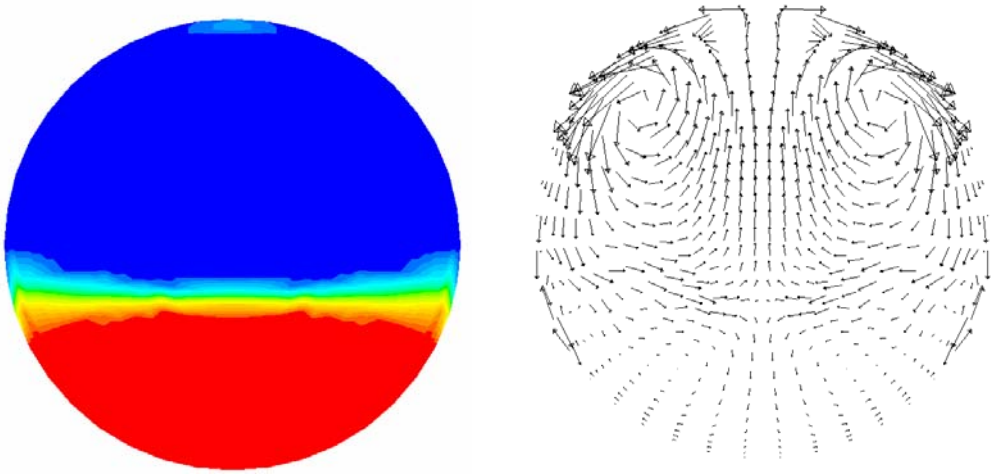
a) 0,0*D* b) -0,2*D*

c) -0,4*D* d) -0,6*D*

e) -0,8*D*

Figura 5.17- Campos de velocidade em diversas secções transversais

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA



a) Fração volumétrica b) Campo de velocidades

Figura 5.18- Fração volumétrica e vetor velocidade na seção transversal -5*D*

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

5.2.4
Coordenadas dos Perfis de Velocidade

Uma comparação quantitativa detalhada entre os dados do presente trabalho e os dados experimentais de Fonseca (2009) será apresentada a seguir, ao longo de linhas verticais nas coordenadas axiais mostradas esquematicamente na Fig. 5.19. Nesta mesma figura, o perfil de velocidade axial do líquido é apresentado nas respectivas coordenadas, de forma a permitir visualizar o conjunto.

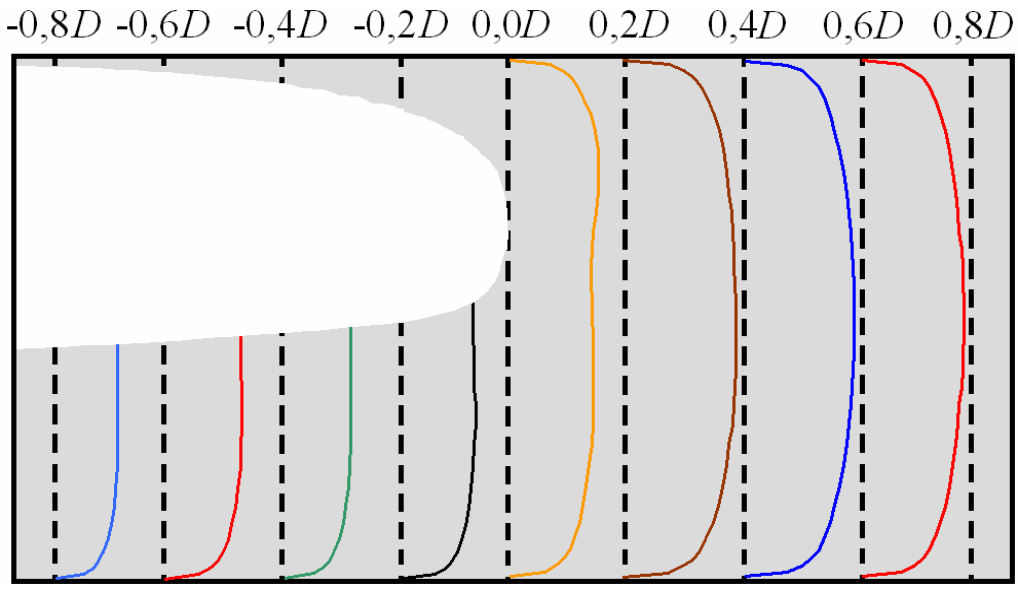


Figura 5.19- Posições de aquisição e comparação de dados

As linhas que ficam atrás do nariz da bolha (0,0*D*), com coordenadas negativas, serão chamadas de linhas "a jusante" e aquelas que ficam a frente, com coordenadas positivas, serão chamadas de linhas "a montante". Neste trabalho, os perfis foram obtidos com uma média no tempo de uma só bolha para cada teste. Os dados experimentais de Fonseca (2009) correspondem a uma média dos perfis de velocidade para pelo menos 150 bolhas, para cada teste.

Apesar de todos os casos apresentarem concordância qualitativa, ao analisarmos os resultados mais detalhadamente, observou-se que somente três dos seis casos investigados apresentaram ótima concordância quantitativa com os dados experimentais. Dessa forma, a comparação detalhada dos perfis de velocidade será realizada separando os casos em dois grupos. O Grupo 1 (Caso 2, Caso 3 e Caso 6) corresponde aos casos com uma boa concordância com os dados experimentais e Grupo 2 (Caso 1, Caso 4 e Caso 5) corresponde aos casos onde a concordância não foi tão boa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

5.2.5
Perfis de Velocidade Axial a Jusante do Nariz da Bolha

As Figuras 5.20 e 5.21 apresentam os perfis das velocidades axiais nas linhas a jusante do nariz da bolha alongada para os casos do Grupo 2 e 1, respectivamente. Os resultados experimentais (representados por símbolos) correspondem somente aos perfis no filme líquido, pois as partículas traçadoras introduzidas para efetuar as experiências com PIV estão presentes só na fase líquida. Por outro lado, os perfis numéricos (representados por linhas contínuas) de ambas as fases são apresentados. Os perfis da fase gasosa poderiam ter sido eliminados para a comparação dos dados, porém optou-se por fornecer a informação disponível referente ao perfil de velocidade no interior da bolha alongada.

Inicialmente, apresenta-se na Fig. 5.20, os dados do Grupo 2, que apresentaram pior resultados. Para o Caso 1, Fig. 5.20(a), só foram apresentadas 3 linhas a jusante por que os dados experimentais para a linha a -0,8*D* não estão disponíveis. Analisando os resultados deste grupo, observa-se que os três casos apresentam comportamento análogo. Pode-se notar que a velocidade máxima da fase líquida vai diminuindo a medida que ficamos mais longe do nariz da bolha. Este comportamento é notado tanto nos dados experimentais como nos dados numéricos, porém a velocidade do filme líquido é superestimada. Com relação a

velocidade na fase gasosa o oposto é verificado, isto é, os perfis crescem quanto mais longe ficam do nariz da bolha. O fato da velocidade do gás ser bem superior à do líquido é esperado, pois a velocidade superficial do gás é bem superior à do líquido, em todos os casos (Tab.5.3)

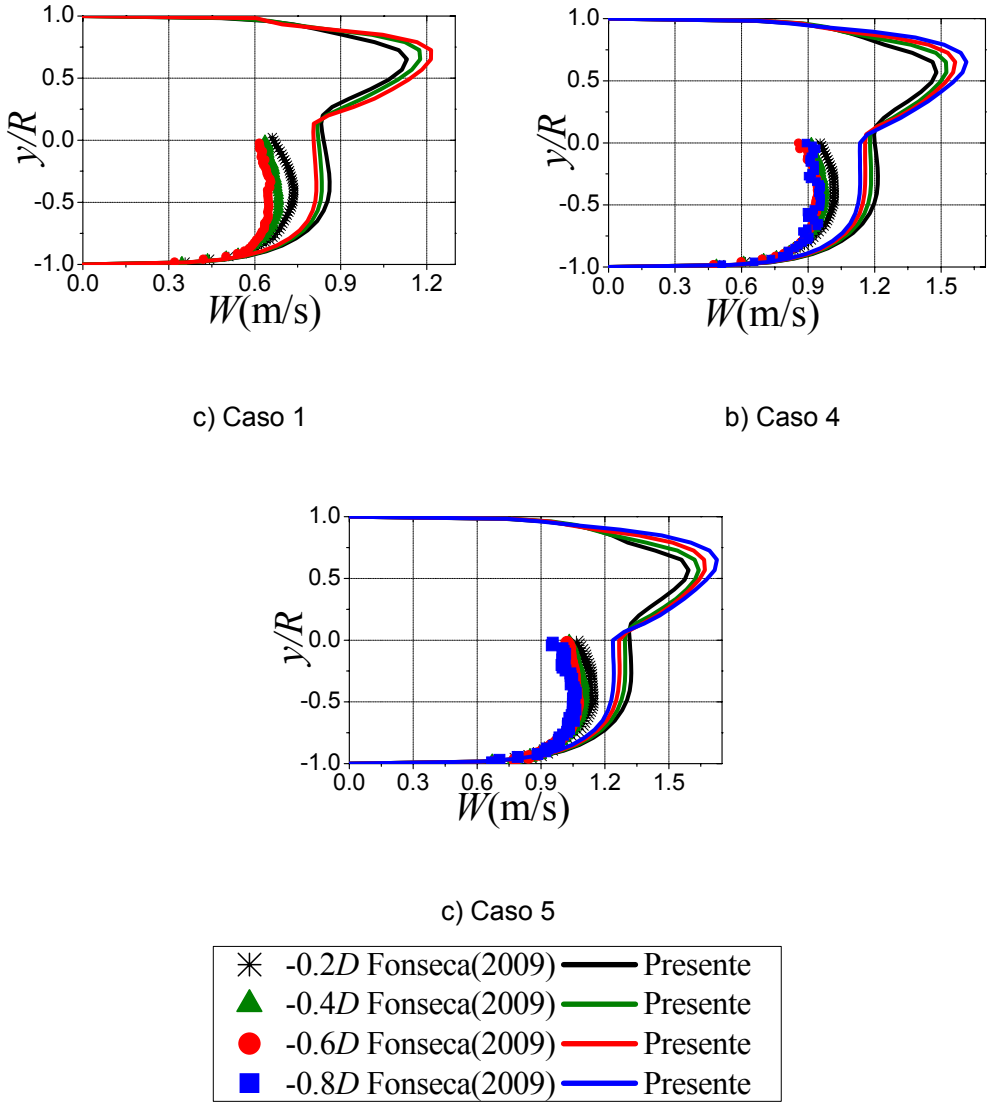
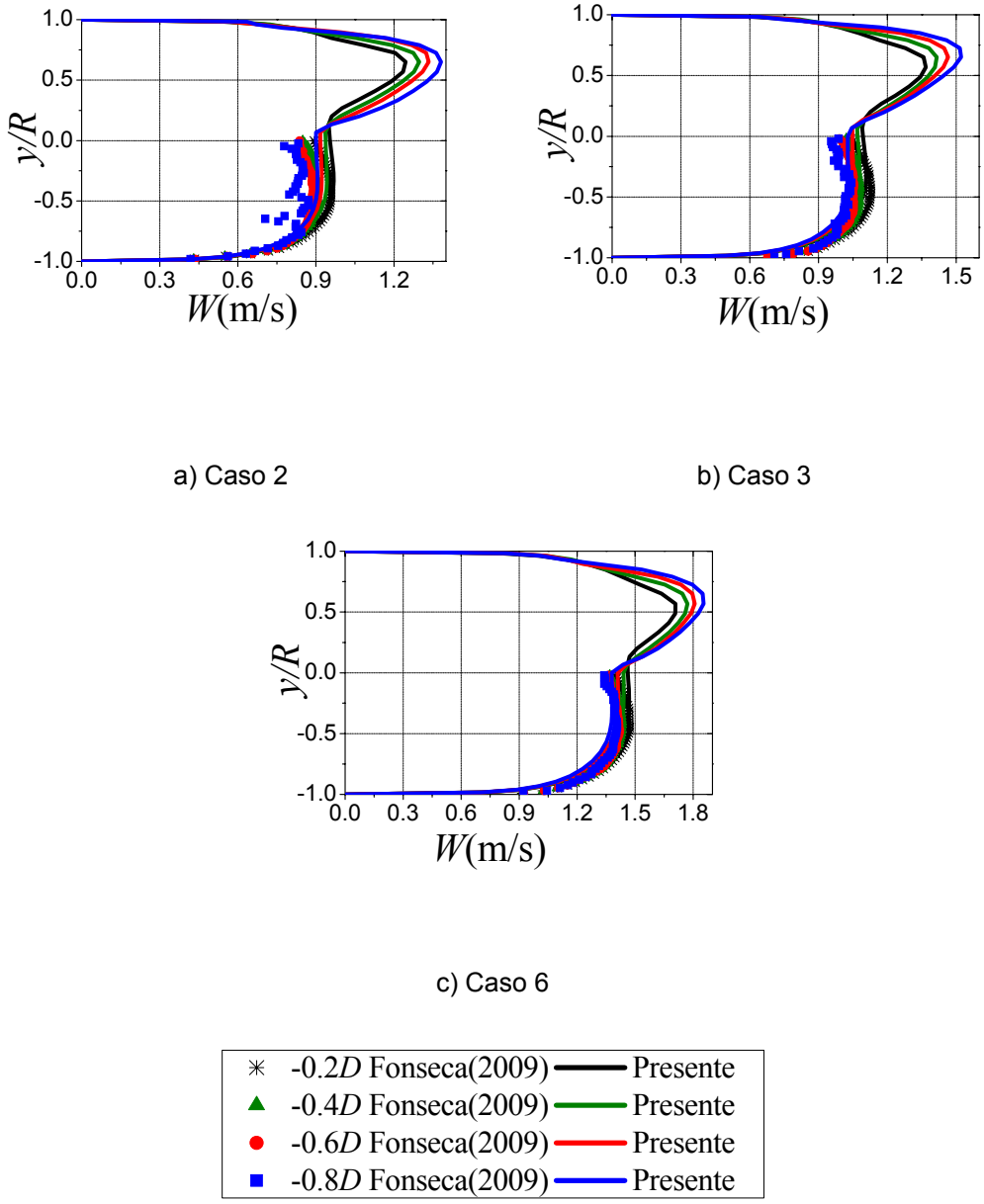


Figura 5.20- Perfis da Velocidade Axial nas linhas a jusante para o Grupo 2

Os resultados referentes aos casos do Grupo 1 são apresentados na Fig. 5.21. O comportamento qualitativo é o mesmo que o observado nos casos do Grupo 2, porém agora a concordância entre os resultados experimentais e numéricos é bastante boa. De forma a melhor avaliar os perfis de velocidade dos casos do Grupo 1, este resultados são repetidos, porém sem superpor todas as seções transversais.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA



a) Caso 2

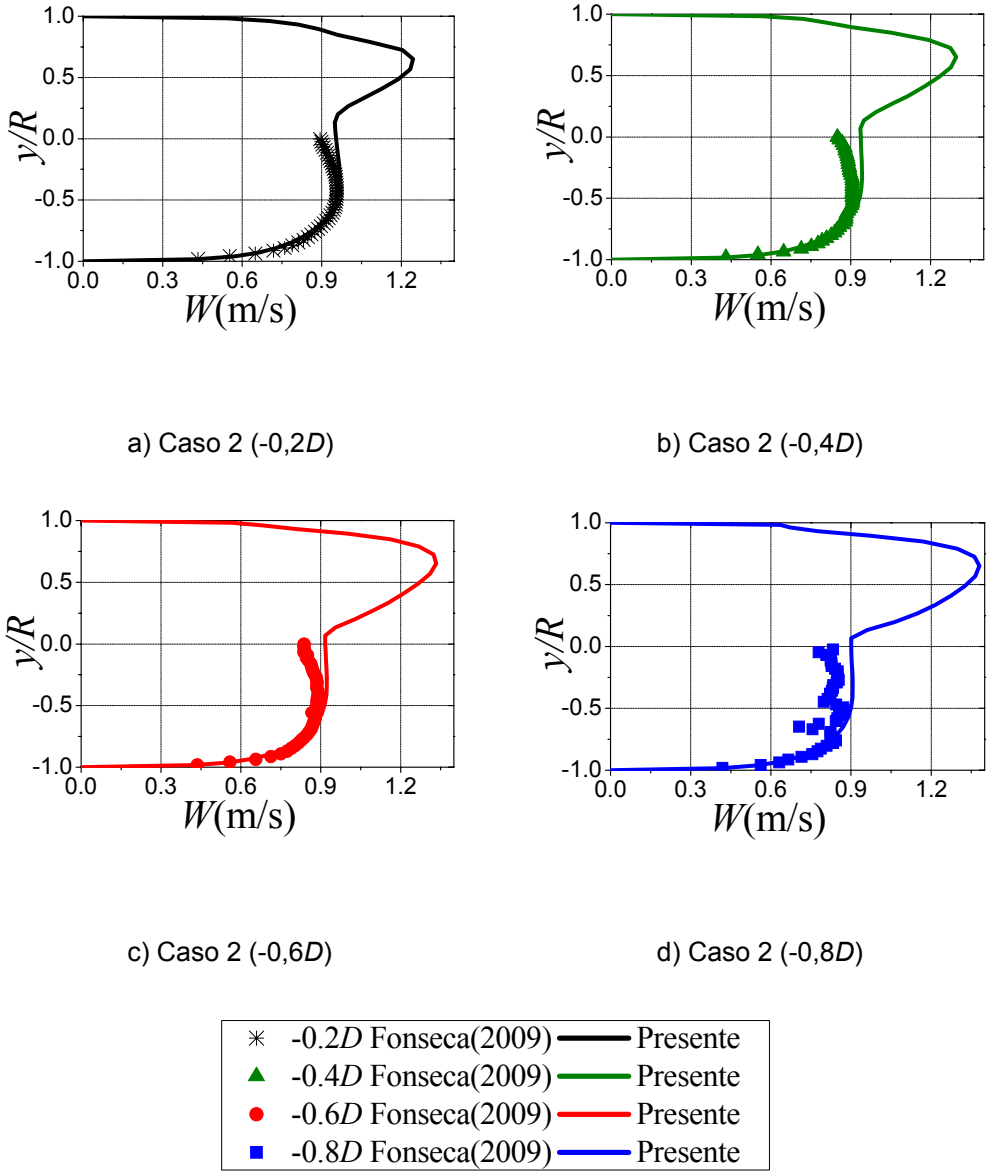
b) Caso 3

c) Caso 6

Figura 5.21- Perfis da Velocidade Axial nas linhas a jusante para o Grupo 1

A Figura 5.22 apresenta os perfis axiais do Caso 2. Se examinarmos os dados experimentais, muito perto da interface, pode se observar que os valores da velocidade vão diminuindo e o perfil faz uma curva para a esquerda, como se houvesse uma parede que amortecesse seu crescimento. Nos dados numéricos, a mudança de fases é suave e não traz consigo esta quebra no perfil de velocidades, o que poderia sugerir um deslizamento entre as fases que o modelo VOF não está conseguindo modelar.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA



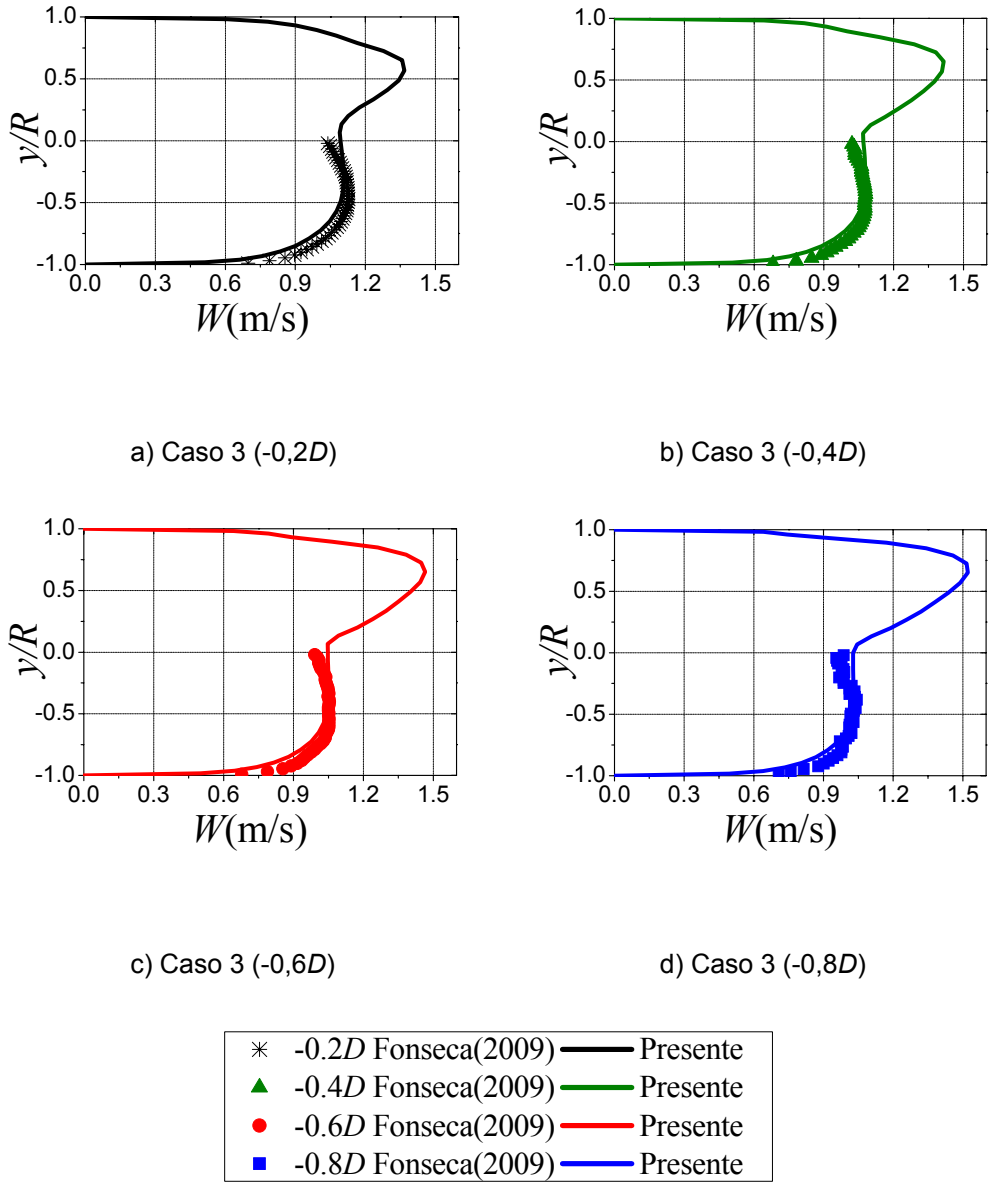
a) Caso 2 (-0,2*D*) b) Caso 2 (-0,4*D*)

c) Caso 2 (-0,6*D*) d) Caso 2 (-0,8*D*)

Figura 5.22- Perfis da Velocidade Axial nas linhas a jusante para o Caso 2

Os perfis de velocidade axial para o Caso 3 e Caso 6, ambos pertencentes ao Grupo 1, encontram-se ilustrados nas Figs. 5.23 e 5.24, respectivamente. Observa-se para ambos os casos, o mesmo comportamento próximo à interface que o Caso 2, isto é, a velocidade do filme líquido cai para coordenadas mais próximas da interface. Note, no entanto, que à medida que a velocidade de mistura cresce (Caso 6, na Fig. 5.24) esta diminuição da velocidade do líquido próximo à interface é mais suave, levando a uma melhor concordância com os dados numéricos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA



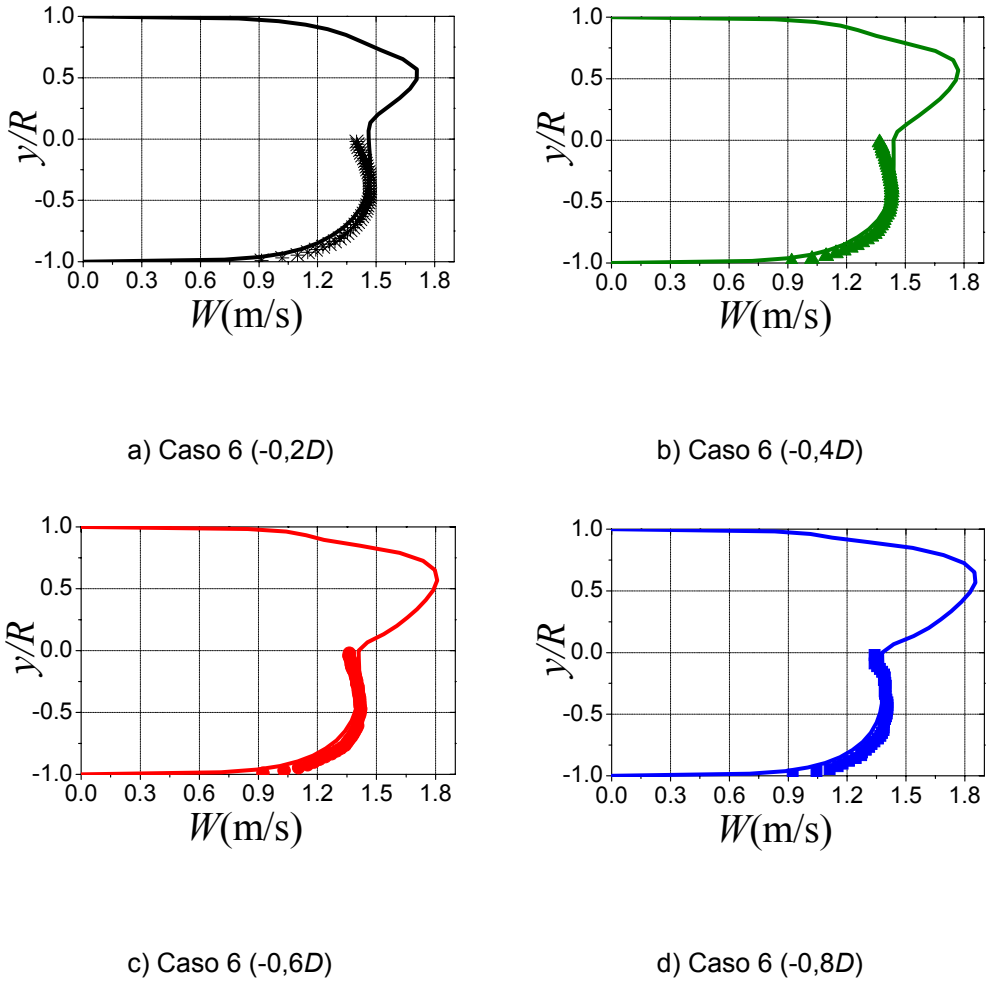
a) Caso 3 (-0,2*D*) b) Caso 3 (-0,4*D*)

c) Caso 3 (-0,6*D*) d) Caso 3 (-0,8*D*)

Figura 5.23- Perfis da Velocidade Axial nas linhas a jusante para o Caso 3

De acordo com Bendiksen (1984) a velocidade de deslizamento ou "*drift*" sofre uma mudança rápida chegando a zero quando o número de Froude crítico Fr_c supera o valor de 3,5. Os testes realizados por Fonseca (2009) não superaram o valor crítico de Fr_c, para confirmar esta informação. Porém, os perfis de velocidade obtidos para o Caso 6 indicam que com o aumento da velocidade de mistura, a velocidade de deslizamento diminui, uma vez que o perfil de velocidade torna-se mais uniforme no líquido. Visando quantificar esta tendência, podemos definir a variável R_{drift} (relação de deslizamento), que consiste na razão entre a velocidade na interface e a velocidade máxima no filme líquido. Quanto maior este valor, pode-se afirmar que menor é o deslizamento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA



a) Caso 6 (-0,2*D*) b) Caso 6 (-0,4*D*)

c) Caso 6 (-0,6*D*) d) Caso 6 (-0,8*D*)

Figura 5.24- Perfil da Velocidade Axial nas linhas a jusante para o Caso 6

A Tabela 5.6 apresenta a razão R_{drift} para cada caso, ordenados da menor para a maior velocidade de mistura. Pode-se notar que para as coordenadas -0,2*D* e -0,4*D*, R_{drift} cresce uniformemente para cada caso, mas o mesmo não acontece para as coordenadas -0,6*D* e -0,8*D*, onde a razão oscila com o aumento de W_m. Baseado nestes resultados pode-se afirmar que apesar do modelo VOF não ter sido projetado para prever deslizamentos na interface, a modelagem é capaz de fornecer as tendências corretas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

Tabela 5.6- Relação de deslizamento

Caso	R_{drift}				
	W_m	-0,2D	-0,4D	-0,6D	-0,8D
1	0,77	0,9650	0,9801	0,9868	0,9894
2	0,87	0,9799	0,9938	0,9940	0,9932
3	0,99	0,9842	0,9907	0,9962	0,9976
4	1,08	0,9855	0,9951	0,9992	0,9988
5	1,18	0,9923	0,9986	0,9987	0,9967
6	1,30	0,9946	0,9989	0,9976	0,9970

5.2.6
Perfis de Velocidade Axial a Montante do Nariz da Bolha

Nesta seção os perfis de velocidade axial nas linhas a montante do nariz da bolha alongada são analisados. De forma análoga ao apresentado para as linhas a jusante, os resultados do Grupo 2 não tiveram boa concordância com os resultados experimentais, portanto, nesta seção só são apresentados os resultados para o Caso 1 do Grupo 2 e todos os Casos do Grupo 1. No entanto, antes de apresentar a comparação entre os perfis de velocidade axial, é interessante verificar se o perfil de velocidades ao final da golfada líquida estável é um perfil completamente desenvolvido, de acordo com observações de Taitel e Barnea (1990), Nicklin et al. (1962), Polonsky et al. (1999a) e Shemer (2003).

No presente trabalho, procurou-se utilizar um domínio grande, de forma a obter uma golfada longa o suficiente para garantir um perfil completamente desenvolvido muito próximo do final da golfada. Para verificar o desenvolvimento do escoamento apresenta-se na Fig. 5.25, o perfil de velocidade do líquido ao longo de uma linha axial exatamente no meio da tubulação para os Casos 1 e 6, que são os de menor e maior vazão respectivamente. Pode-se observar que entre as coordenadas z = 0,31m até z = 0,43m a velocidade é aproximadamente constante, indicando que o escoamento é desenvolvido para ambos os casos. Para melhor observar que na frente da bolha o escoamento é desenvolvido, na mesma figura foram incluídas as coordenadas referentes ao centro da tubulação (em vermelho) e as coordenadas onde os perfis radiais são analisados, variando de –0,8 D a +0,8 D do nariz da bolha do Caso 1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

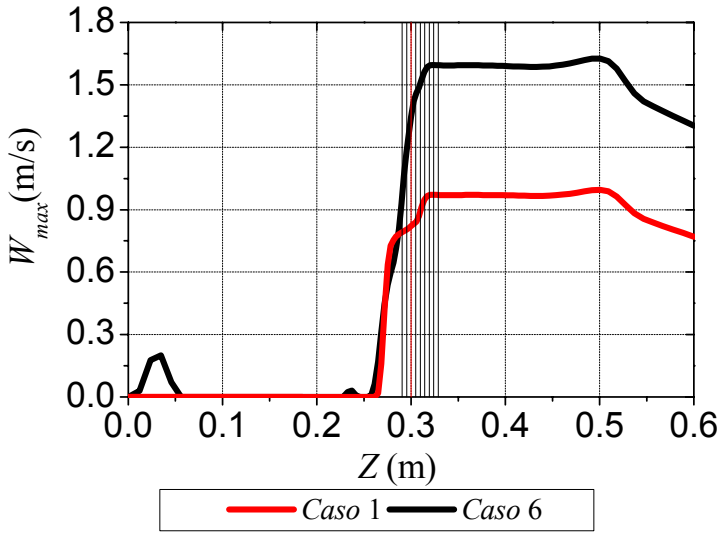


Figura 5.25- Desenvolvimento da velocidade axial ao longo da tubulação

A informação de que o escoamento é desenvolvido na frente da bolha alongada pode ser confirmada analisando os perfis ao longo da linha vertical que passa pelo cento do duto na Fig. 5.26, para o Caso 1, onde pode-se observar claramente que os perfis das velocidades para as linhas em +0,4*D*, +0,6*D* e +0,8*D* se superpõem.

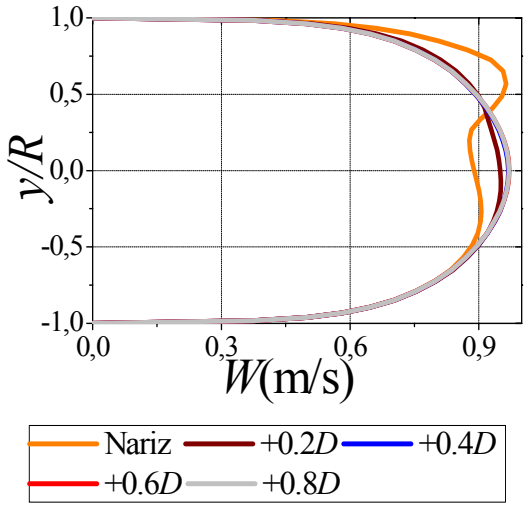
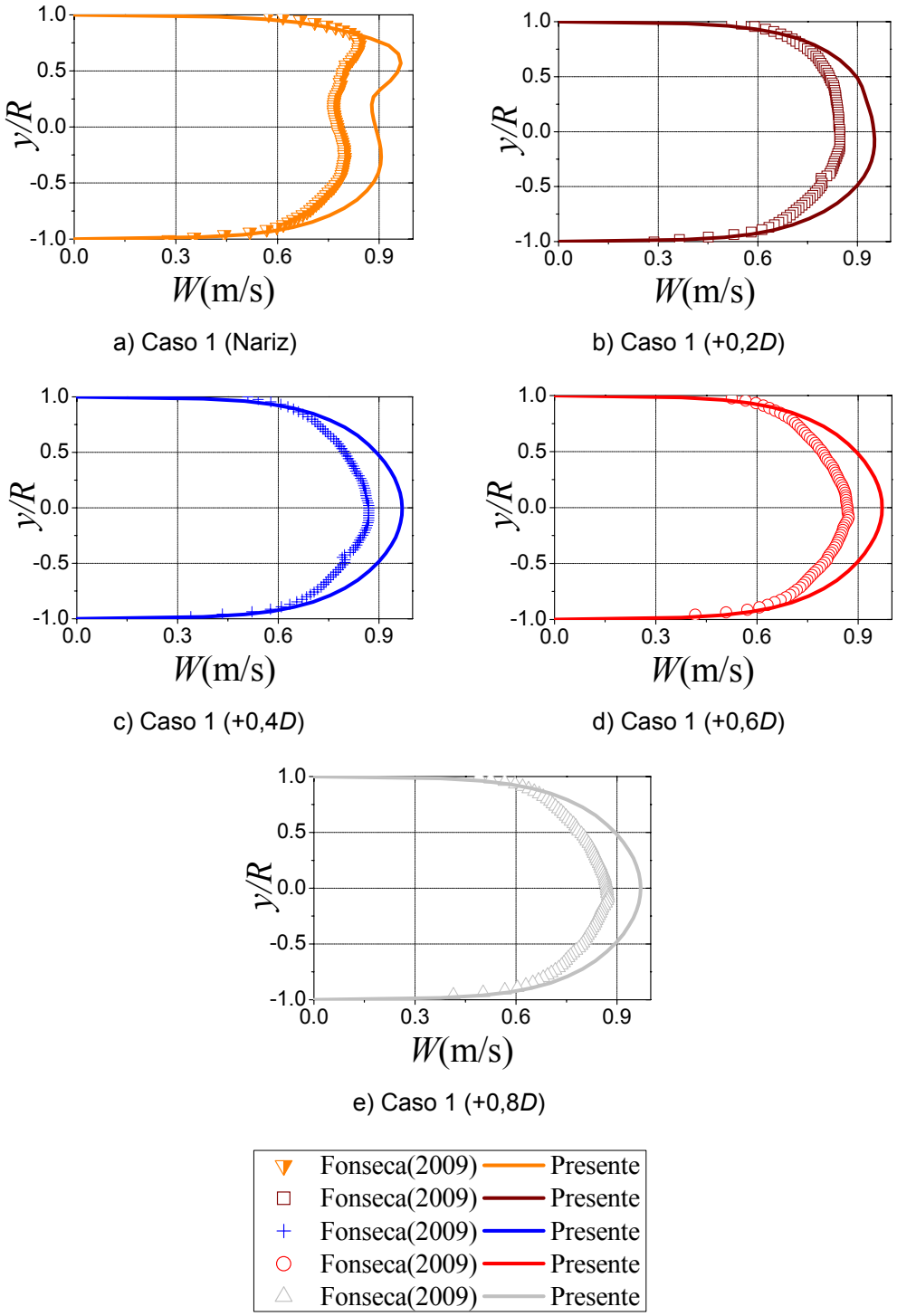


Figura 5.26- Perfis da velocidade axial a montante da bolha

Os perfis de velocidade axial experimental e numérico para o Caso 1 do Grupo 2 são apresentados na Fig. 5.27. Como já mencionado, o comportamento qualitativo dos perfis é muito bom, porém, a velocidade é superestimada, apresentando uma diferença da ordem de 10%. Observa-se que a velocidade mais elevada do ar no interior da bolha influencia a velocidade do líquido na coordenada do nariz da bolha (Fig. 5.27(a)). A medida que se afasta do nariz, o

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

perfil de velocidade torna-se mais uniforme, tendendo ao perfil desenvolvimento como já mencionado. Todos os outros casos do Grupo 2 apresentaram um desempenho equivalente.



a) Caso 1 (Nariz)

b) Caso 1 (+0,2*D*)

c) Caso 1 (+0,4*D*)

d) Caso 1 (+0,6*D*)

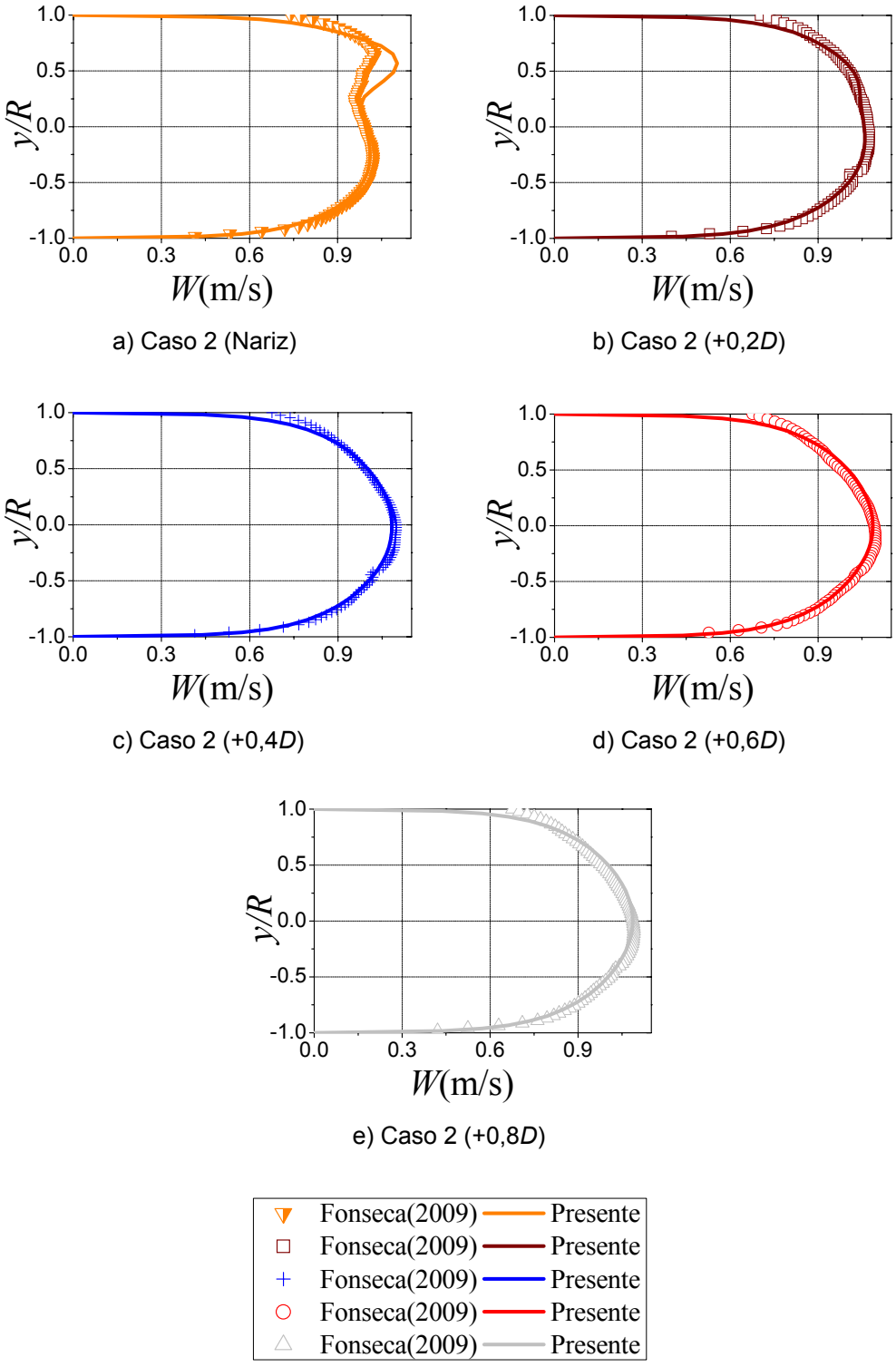
e) Caso 1 (+0,8*D*)

Figura 5.27- Perfis da Velocidade Axial nas linhas a montante para o Caso 1

Os resultados para o casos do Grupo 1 são apresentados nas Fig. 5.28, Fig. 5.29 e Fig. 5.30, correspondentes aos Casos 2, 3 e 6. Nota-se que em todos os

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

casos, a concordância entre os perfis numéricos e experimentais é muito boa para todas as seções.



a) Caso 2 (Nariz)

b) Caso 2 (+0,2*D*)

c) Caso 2 (+0,4*D*)

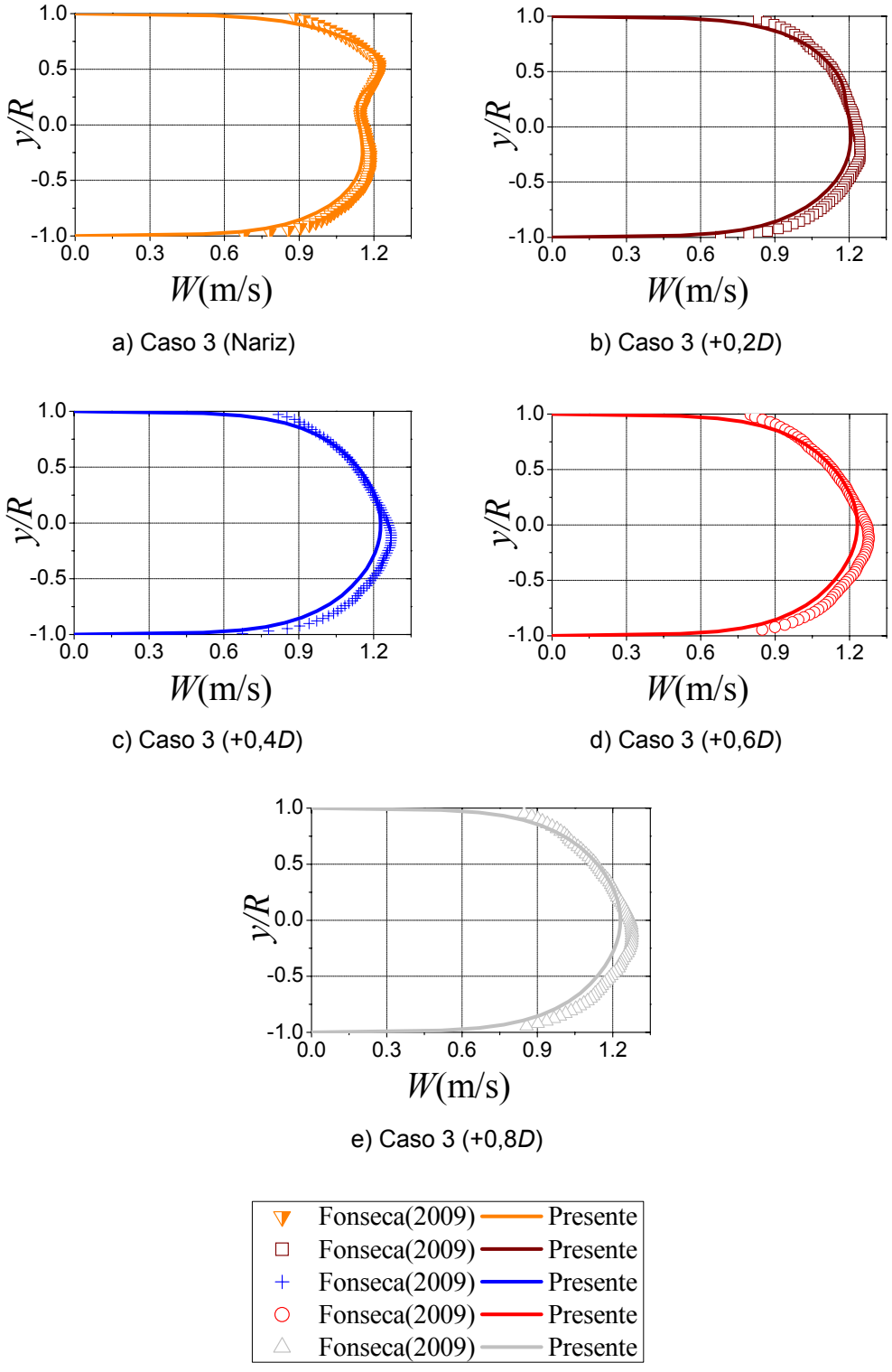
d) Caso 2 (+0,6*D*)

e) Caso 2 (+0,8*D*)

Figura 5.28- Perfil da Velocidade Axial nas linhas a montante para o Caso 2

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

O Caso 3 é o que apresenta a melhor concordância entre os dois resultados na coordenada do nariz da bolha, o que talvez possa ser explicado pelo fato que este caso é o que apresenta a menor diferença entre as velocidades superficiais de gás e líquido (Tab. 5.3).



a) Caso 3 (Nariz)

b) Caso 3 (+0,2*D*)

c) Caso 3 (+0,4*D*)

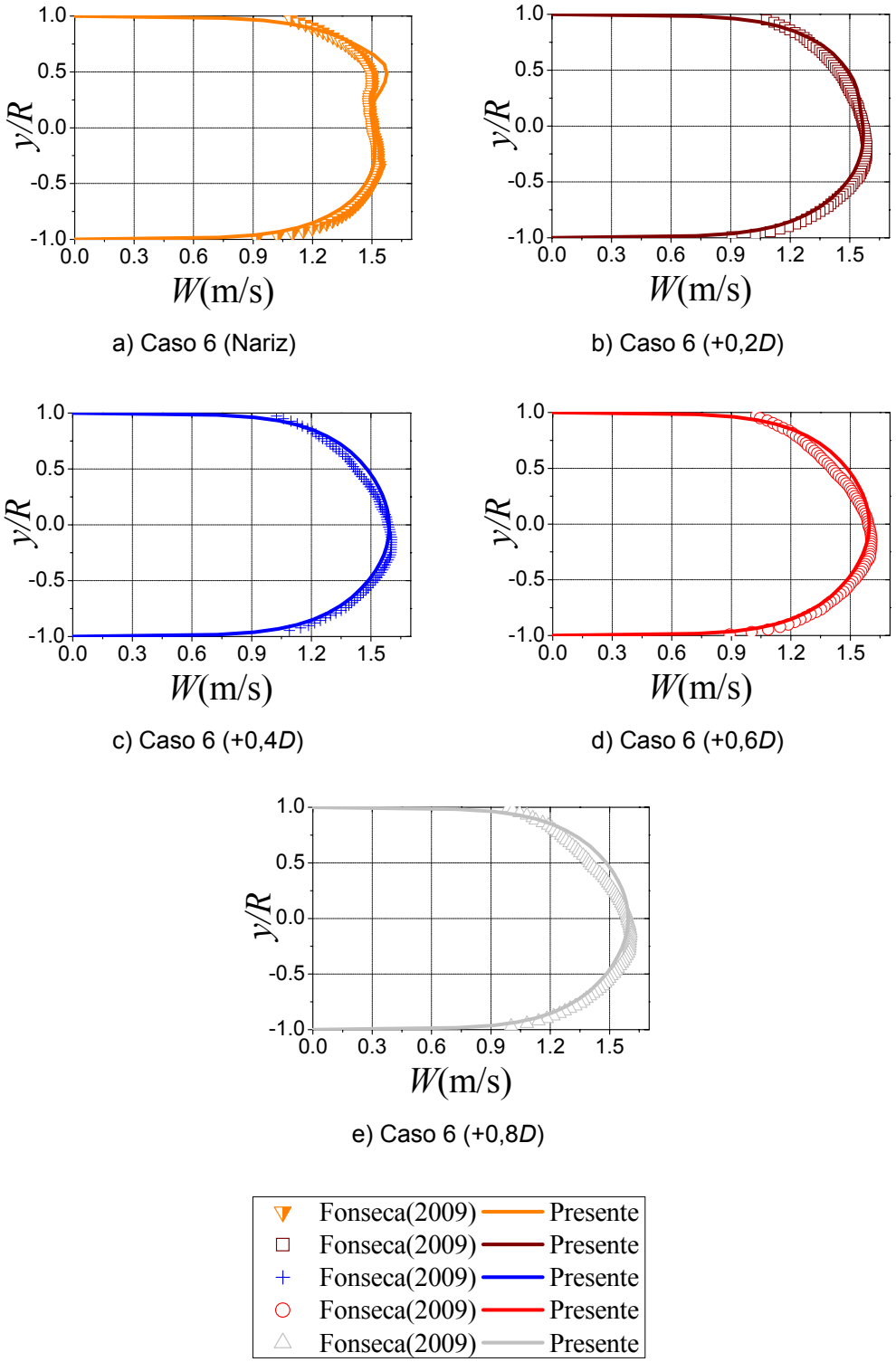
d) Caso 3 (+0,6*D*)

e) Caso 3 (+0,8*D*)

Figura 5.29- Perfil da Velocidade Axial nas linhas a montante para o Caso 3

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

Pode-se observar que o Caso 3 (Fig. 5.29) e Caso 6 (Fig. 5.30) apresentam o perfil de velocidade experimental com uma inclinação para a base da tubulação, o que já foi discutido na seção 5.2.3, quando comparou-se a solução com o perfil empírico “Lei 1/7”.



a) Caso 6 (Nariz)

b) Caso 6 (+0,2*D*)

c) Caso 6 (+0,4*D*)

d) Caso 6 (+0,6*D*)

e) Caso 6 (+0,8*D*)

Figura 5.30- Perfil da Velocidade Axial nas linhas a montante para o Caso 6

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

Estes dois casos apresentam a mesma velocidade superficial de líquido, a qual é a maior vazão de líquido testada. Nota-se ainda, que como já discutido este comportamento não é acompanhado pelos perfis numéricos de forma muito vidente, como ilustrado na discussão sobre a penetração radial (seção 5.2.2).

5.2.7
Perfis de Velocidade Vertical a Jusante do Nariz da Bolha

Nesta seção os perfis da componente de velocidade na direção "*y*" são analisados nas linhas a jusante do nariz da bolha alongada. De forma análoga ao empregado para a análise dos perfis do componente axial da velocidade axial, as linhas contínuas representam os perfis obtidos numericamente, enquanto que os símbolos são utilizados para representar os dados experimentais.

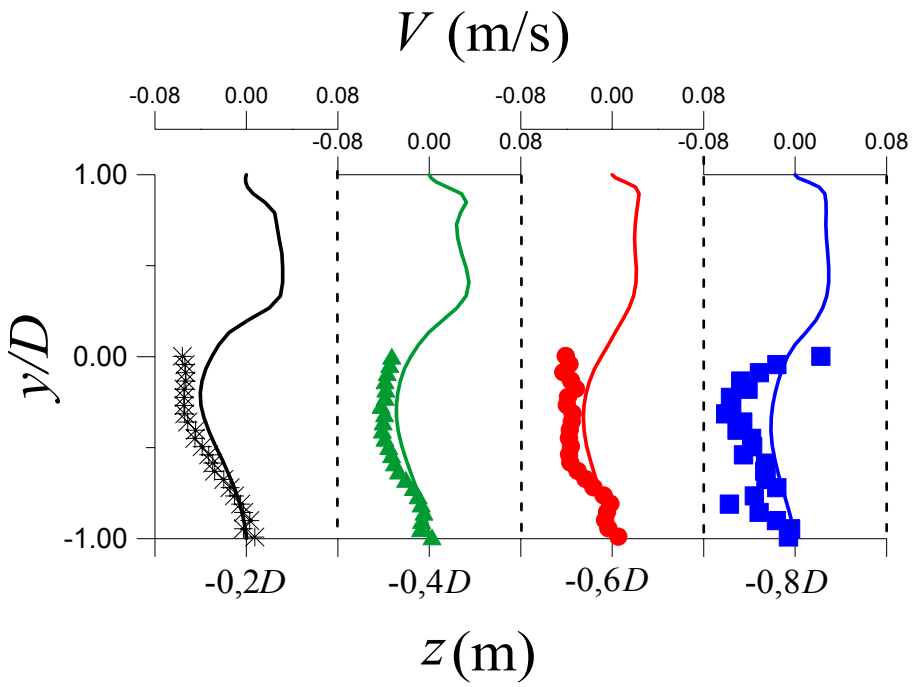
Os resultados correspondentes aos casos do Grupo 1 são apresentados na Fig. 5.30, enquanto que os perfis do Grupo 2 encontram-se na Fig. 5.31. Em ambas as figuras, os perfis das velocidades a jusante do nariz da bolha são apresentados para todas as coordenadas a jusante no mesmo gráfico. Nestes gráficos, no eixo *x* inferior encontra-se a coordenada axial onde o perfil está localizado e no eixo *x* superior encontra-se o valor do componente vertical da velocidade *V*.

Com relação ao componente vertical de velocidade no líquido não foi identificado nenhuma concordância melhor ou pior com relação aos dados experimentais. Selecionaram-se então dois casos de cada grupo para serem apresentados. A Figura 5.31 apresenta os Casos 3 e 6 do Grupo 1, enquanto que a Fig. 5.32 apresenta os resultados dos Casos 1 e 4 do Grupo 2. Estes casos foram selecionados por corresponderem as maiores (Grupo 1) e menores (Grupo 2) velocidades superficiais de líquido. Analisando as figuras, pode ser observado que a velocidade vertical no filme líquido é sempre negativa para todos os casos. Os dados numéricos concordam relativamente bem com os dados experimentais, e ambos apresentam o menor valor de *V* na zona mais próxima à interface líquido-gás.

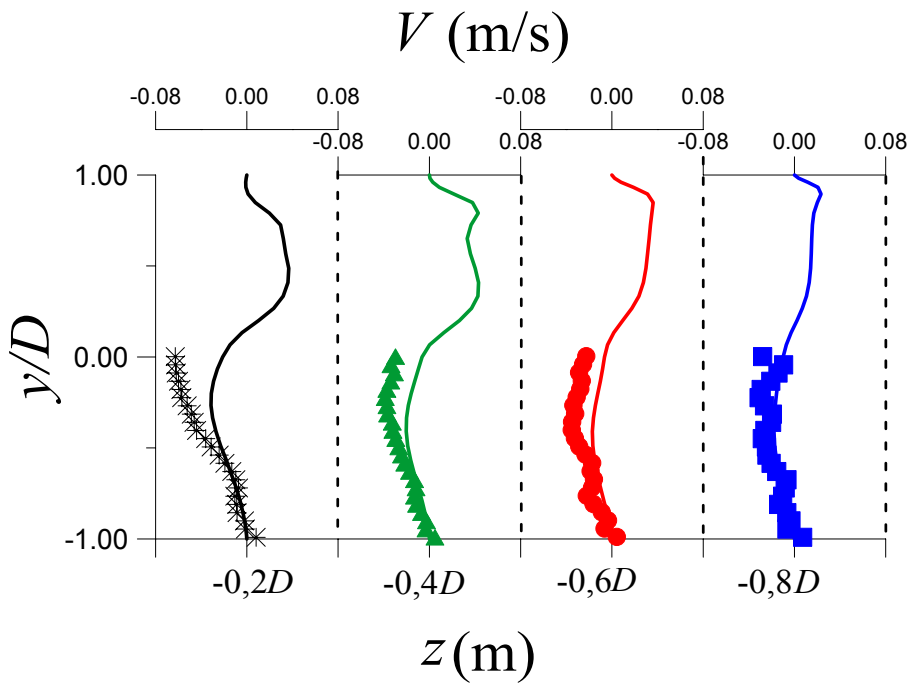
A zona gasosa (dados numéricos) possui valores positivos, atribuídos como já vimos às recirculações que existem nesta fase, como apresentado na seção 5.2.3, quando analisou-se os vetores de velocidade nas secções transversais da tubulação (Fig. 5.17).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

Assim como no caso do componente axial, não dispomos de dados experimentais para a coordenada -0,8 *D* para o Caso 1.



a) Caso 3



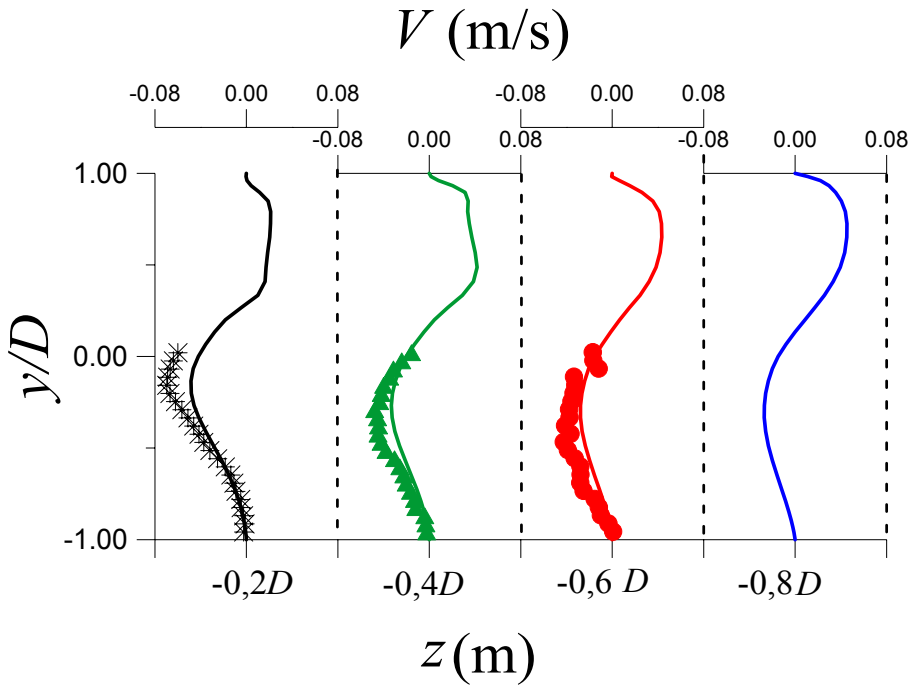
b) Caso 6

Figura 5.31- Perfis da velocidade vertical nas linhas a jusante. Grupo 1

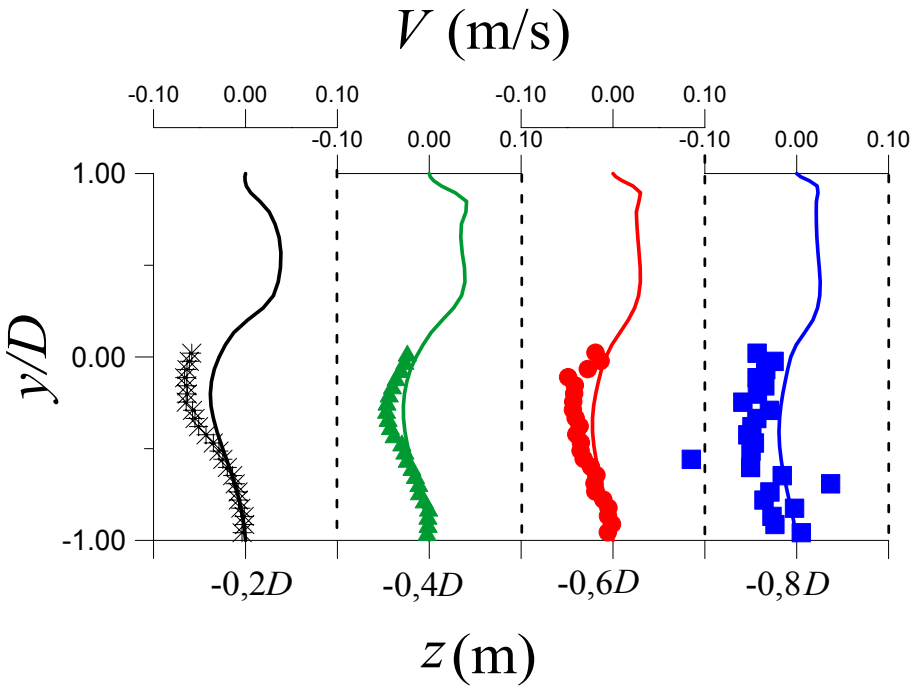
Analisando-se os perfis experimentais correspondentes a esta coordenada

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

para os diversos casos, observa-se um maior espalhamento dos dados, provavelmente devido a menor espessura do filme, o que dificulta a obtenção dos dados experimentais, e conseqüentemente a comparação com os dados numéricos.



a) Caso 1



b) Caso 4

Figura 5.32- Perfis da velocidade vertical nas linhas a jusante. Grupo 2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

Observa-se nos perfis do Grupo 1 na Fig. 5.31, uma maior discrepância entres os dados numérico e experimental na coordenada -0,2 *D*. Os dois casos selecionados possuem a mesma velocidade superficial de líquido, no entanto a velocidade superficial do gás do Caso 6 é maior, o que pode explicar a maior discrepância observada neste caso, na região da interface.

Analisando os perfis verticais na Fig. 5.32 correspondente ao Grupo 2, observa-se o mesmo comportamento descrito para este componente de velocidade que para os casos do Grupo 1. Estes casos apresentam a menor velocidade superficial de líquido, e apesar da velocidade superficial do gás ser maior no Caso 4 que no Caso 1, as discrepâncias observadas são da mesma ordem de grandeza.

5.2.8
Perfis de Velocidade Vertical a Montante do Nariz da Bolha

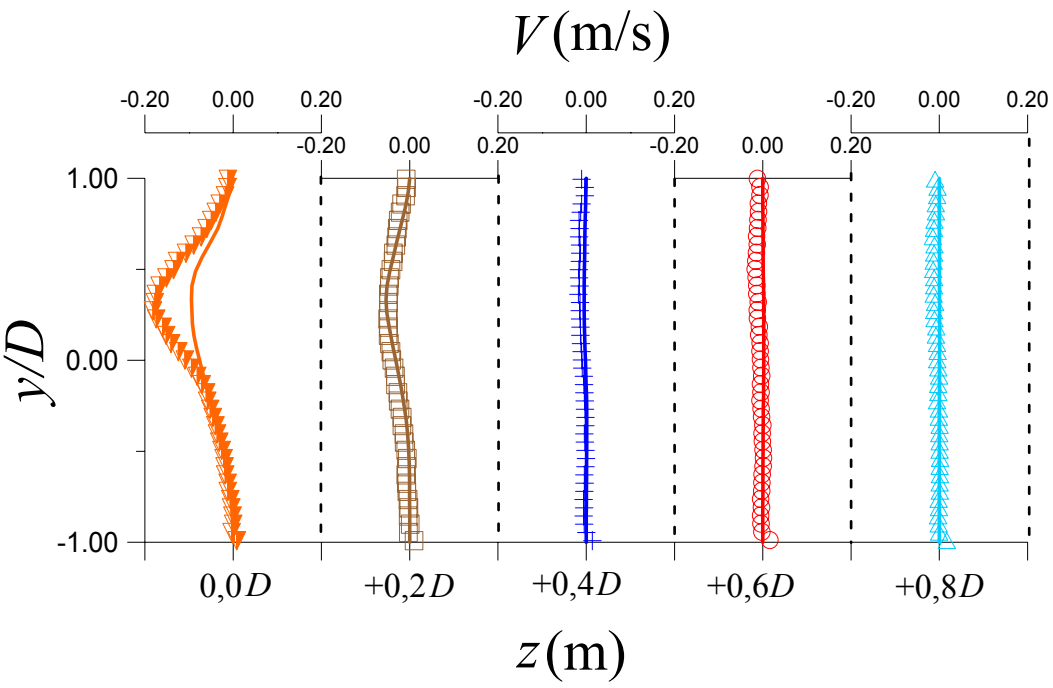
O mesmo tipo de análise apresentada na seção anterior é repetido aqui, para as linhas verticais a montante do nariz da bolha. Os mesmos casos foram selecionados e a mesma forma de apresentação é utilizada.

As Figuras. 5.33 e 5.34 correspondem as casos do Grupo 1 (Casos 3 e Caso 6) e Grupo 2 (Casos 1 e Caso 4), respectivamente.

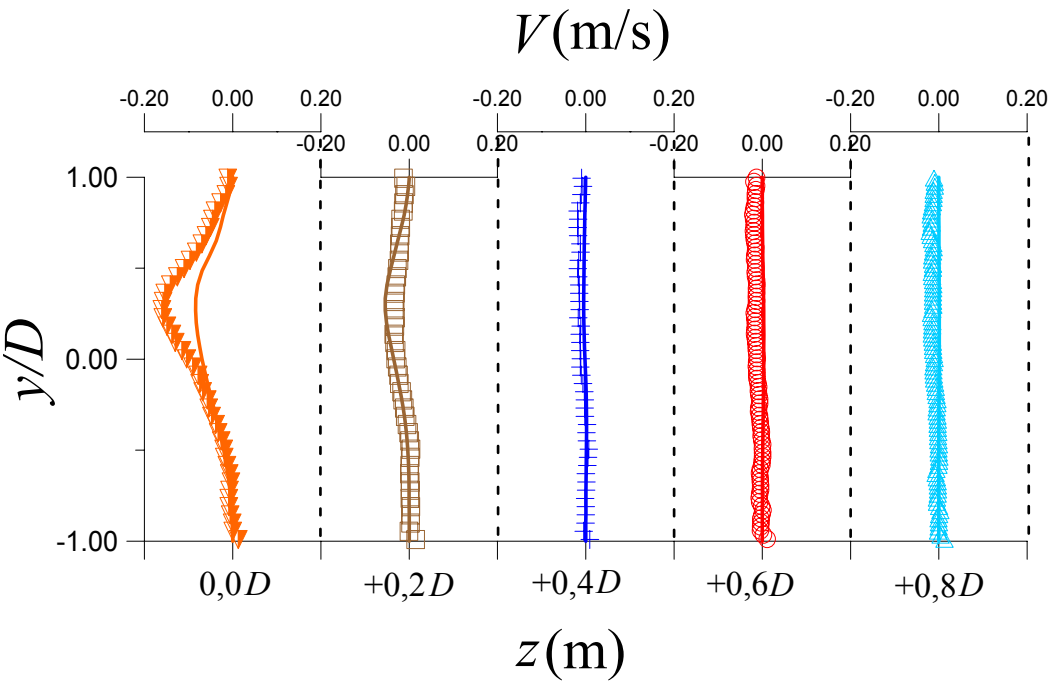
Analisando os perfis de todos os casos no nariz da bolha, observa-se que a mesma forma do perfil foi captada, porém, o pico de velocidade foi subestimado. Observa-se ainda que todos os casos apresentaram a melhor concordância com os perfis experimentais na coordenada +0,2*D*.

Note que nas coordenadas +0,4*D*, +0,6*D* e +0,8*D* o modelo numérico previu uma velocidade vertical praticamente nula, em discordância com os dados experimentais, os quais apresentam uma velocidade negativa na parte superior da tubulação, o que está em acordo com o perfil axial já analisado, cujo pico de velocidade encontra-se deslocado para baixo. Pode-se observar ainda no caso do Grupo 1, com maior velocidade superficial de líquido, estas velocidades são mais intensas. Ainda analisando os perfis experimentais nestas coordenadas, nota-se uma oscilação nestes para todos os casos. Este efeito é mais evidente com o incremento da vazão. Estas oscilações podem ser devido a transferência de bolhas através da golfada, provenientes da cauda da bolha que viaja a frente da golfada em estudo. Este fenômeno não é simulado numericamente, pois somente uma célula unitária foi modelada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA



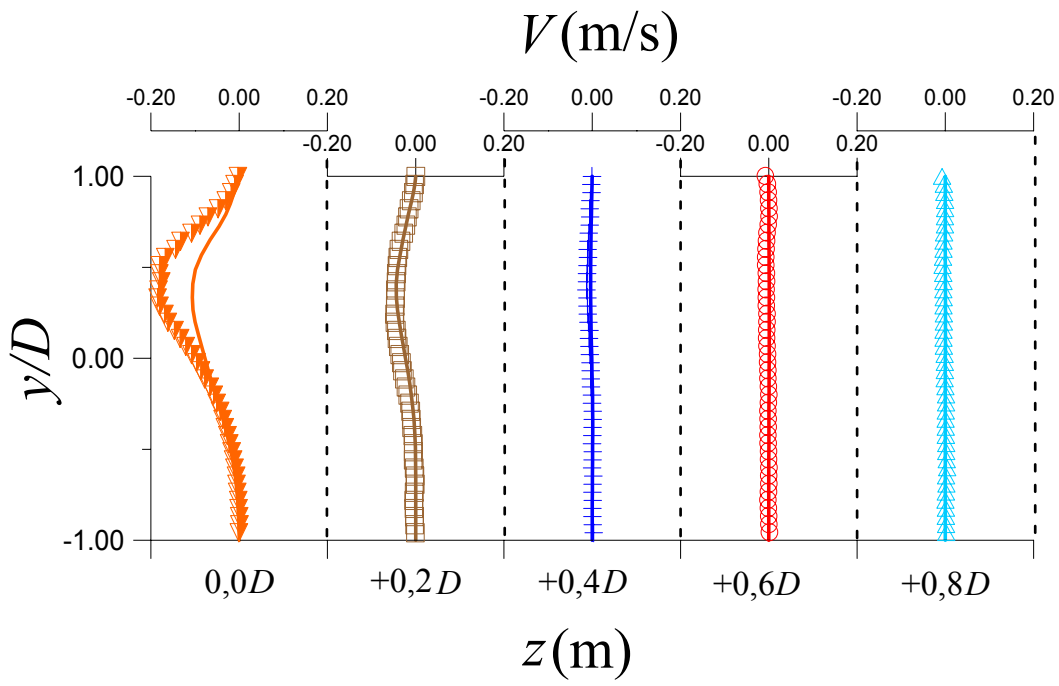
a) Caso 3



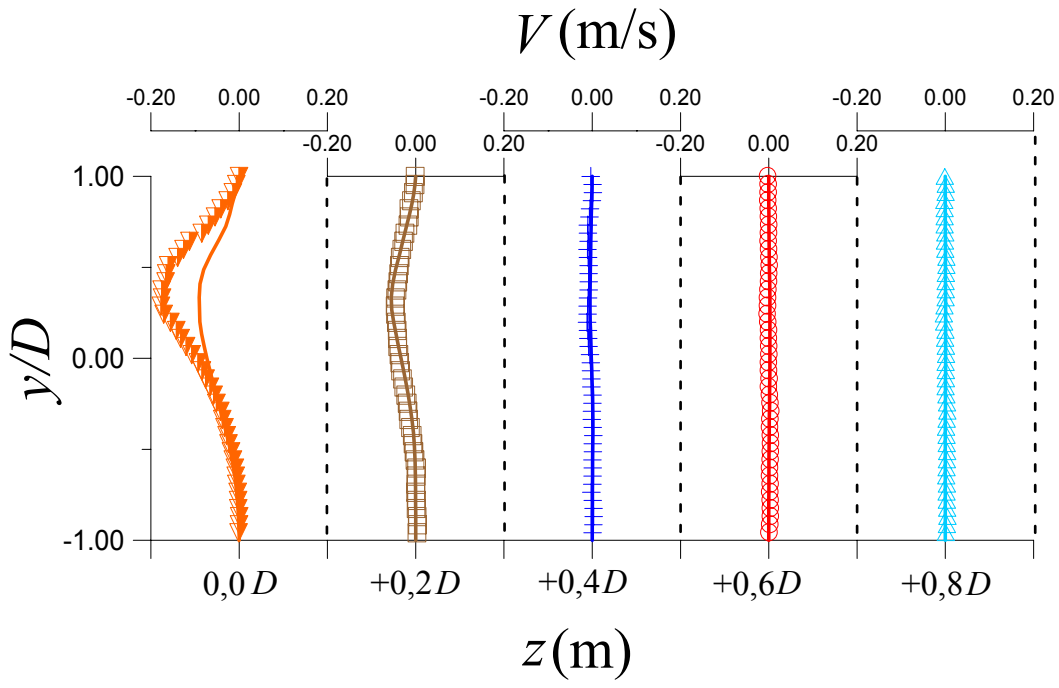
b) Caso 6

Figura 5.33- Perfis da velocidade vertical nas linhas a montante. Grupo 1

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA



a) Caso 1



b) Caso 4

Figura 5.34- Perfis da Velocidade Vertical nas linhas a montante. Grupo 2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

5.2.9
Quantificação das Diferenças entre Dados Numéricos e Experimentais

Apesar dos bons resultados obtidos para os casos do Grupo 1, observa-se que na linha vertical que passa pelo nariz da bolha alongada, o perfil de velocidade axial apresenta uma quebra no sentido oposto à direção do escoamento, produzida pela mudança de fase nesta zona. Este é exatamente o mesmo fenômeno que foi observado nos perfis nas linhas a jusante. Uma possível explicação pode estar relacionada com a capacidade de previsão da velocidade de deslizamento W_{drift} pelo modelo VOF. Visando identificar este fenômeno, investiga-se a seguir, a partir dos dados numéricos, qual é o fator de distribuição C_0, assim como da velocidade de deslizamento

Trabalhando com os dados obtidos numericamente e auxiliados pela correlação de Nicklin et al. (1962) formulamos a seguinte equação:

$$\frac{W_T^*}{\sqrt{g\,D}} = C_{0num}\,Fr + C_1 \quad ; \quad Fr_m = \frac{W_m}{\sqrt{g\,D}} \tag{5.6}$$

Uma regressão linear desta equação fornece os valores para C_{0num} e C_{1num}, os quais apresentados na tabela 5.7. O valor obtido para C_0 está dentro da faixa obtida experimentalmente por Bendiksen (1984) para uma tubulação horizontal com diâmetro de 0,0242 m, a qual é: $1{,}009 \leq C_0 \leq 1{,}188$. De igual forma o valor de W_{drift} fica dentro do faixa dos valores obtidos: $-0{,}004 \leq W_{drift} \leq 0{,}181$ A Figura 5.35 apresenta a equação obtida a partir da referida regressão linear e os pontos obtidos com os dados numéricos.

Tabela 5.7- Resultados da regressão linear para C_{0num} e C_1

Casos	W_T^* (m/s)	W_m (m/s)	Fr_m	$\frac{W_T^*}{\sqrt{g\,D}}$	C_{0num}	C_1	W_{drift}
1	0,956	0,770	1,587	1,970	1,116	0,202	0,098
2	1,067	0,868	1,789	2,199	1,116	0,202	0,098
3	1,205	0,991	2,042	2,483	1,116	0,202	0,098
4	1,308	1,083	2,232	2,696	1,116	0,202	0,098
5	1,416	1,181	2,434	2,918	1,116	0,202	0,098
6	1,552	1,304	2,687	3,199	1,116	0,202	0,098

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

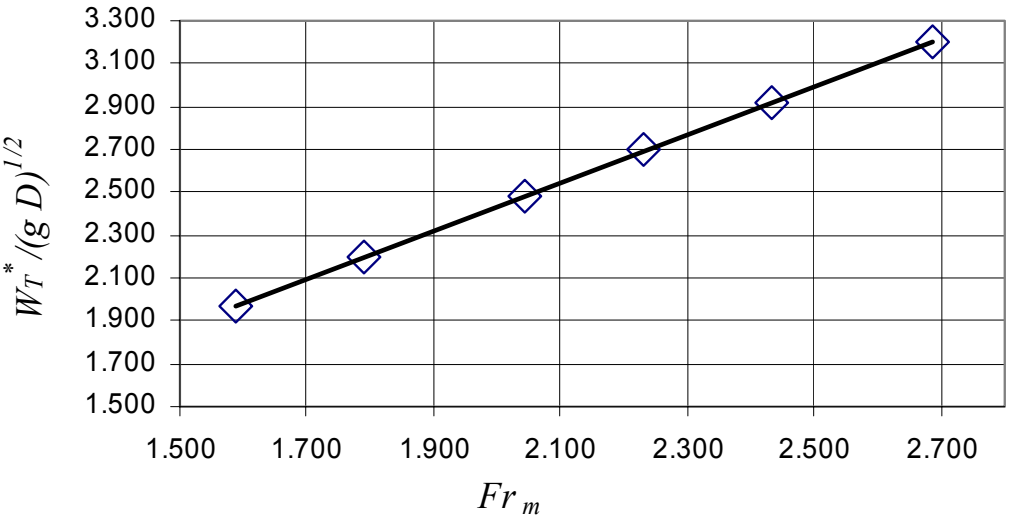


Figura 5.35- Regressão linear para os dados numéricos obtidos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

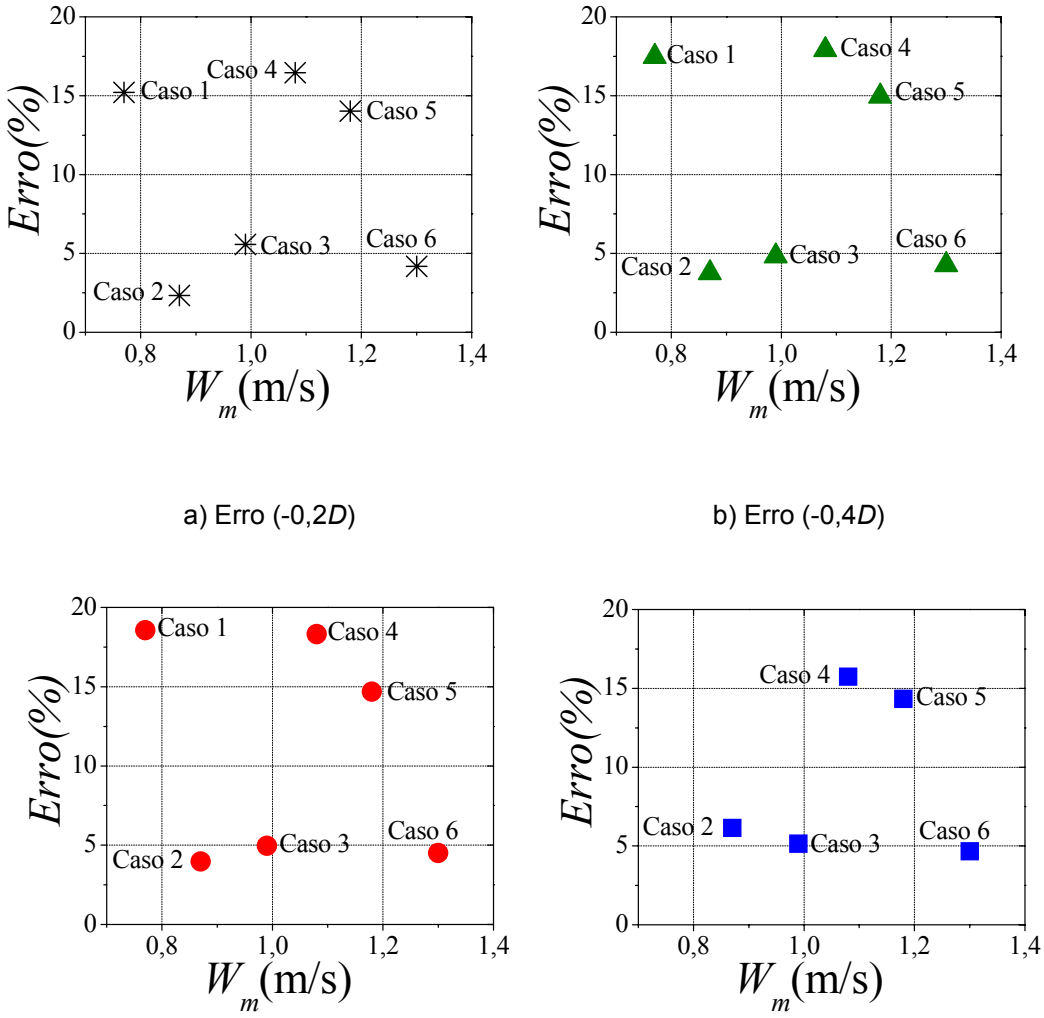
A velocidade de deslizamento prevista pelo modelo VOF, demonstra que o modelo é capaz de modelar deslizamentos. A curvatura no perfil da velocidade na região da interface pode ser devido a um aumento de dissipação da turbulência, que reduz o nível de turbulência nesta região e desacelera o filme de líquido.

Para quantificar os resultados apresentados, utilizaremos o erro relativo, calculado com

$$Erro(\%) = \frac{\sum \left| W_{\exp} - W_{num} \right|}{N\, W_m} \times 100\% \qquad (5.7)$$

onde N é o número de dados, W_{exp} e W_{num}, são as velocidades experimentais e numéricas. Em todos os casos, o número de dados experimentais não coincidiu com os dados numéricos. Além disso, os dados numéricos são obtidos nos nós computacionais e não na mesma coordenada vertical experimental. Dessa forma, visando realizar uma comparação entre os dados para a mesma coordenada vertical, criou-se um algoritmo em MATLAB™ para interpolar os dados numéricos.

As Figuras 5.36 e 5.37 correspondem aos gráficos de erros do componente axial de velocidade nas linhas a jusante e montante, respectivamente.



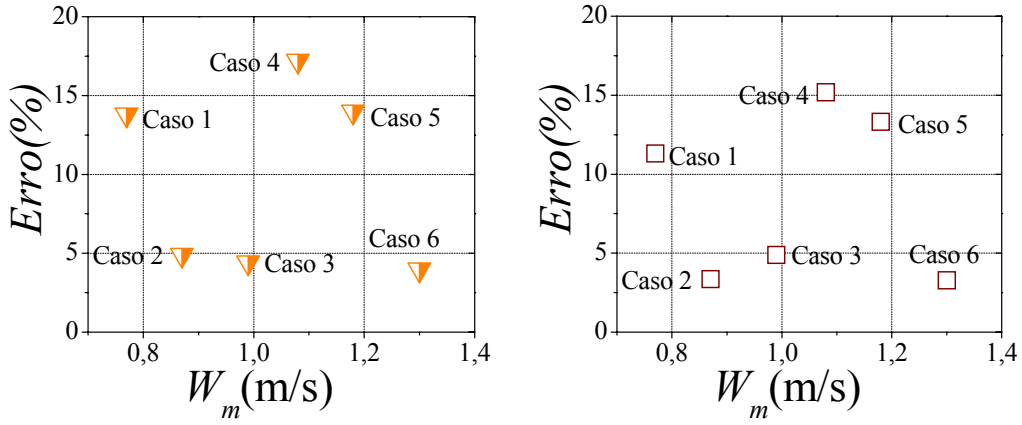
a) Erro (-0,2*D*) b) Erro (-0,4*D*)

c) Erro (-0,6*D*) d) Erro (-0,8*D*)

Figura 5.36- Erro relativo da velocidade axial nas linhas a jusante

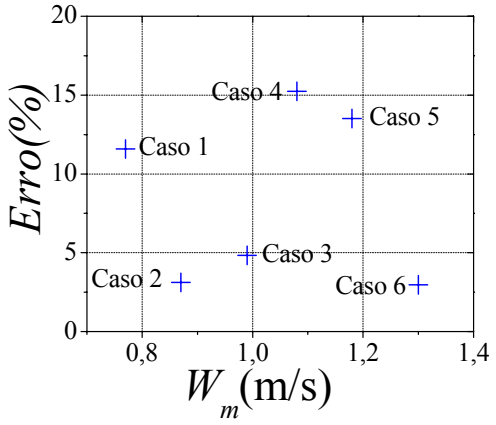
Analisando as Figs. 5.36 e 5.37 se observa claramente que os casos pertencentes ao Grupo 1 apresentam um erro médio aproximadamente igual a 5%, enquanto que os casos do Grupo 2 possuem erros da ordem de 15%. O Caso 2 do Grupo 1 apresenta o menor e maior erro para o componente axial da velocidade, variando de 2,33 % (na coordenada -0,6 *D*) a 6,15% (na coordenada -0,8 *D*). Já o menor e maior erro do Grupo 2 corresponde ao Caso 1, onde o menor erro ocorre na coordenada 0,6 *D*, sendo igual a 11,28% enquanto que o maior erro igual a 18,57% (coordenada -0,6 *D*).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

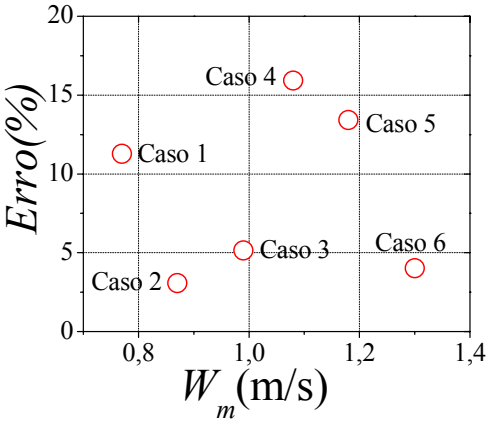


a) Erro (Nariz)

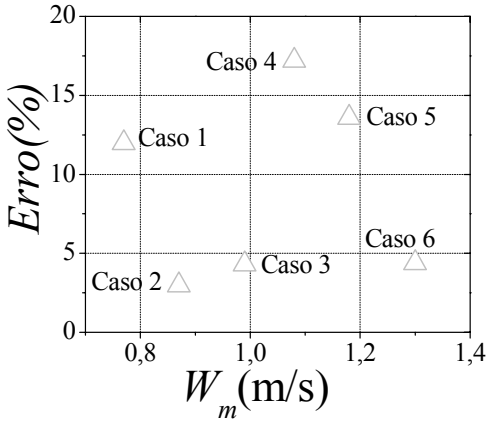
b) Erro (+0,2*D*)



c) Erro (+0,4D)



d) Erro (+0,6D)



e) Erro (+0,8*D*)

Figura 5.37- Erro Relativo da velocidade axial nas linhas a montante

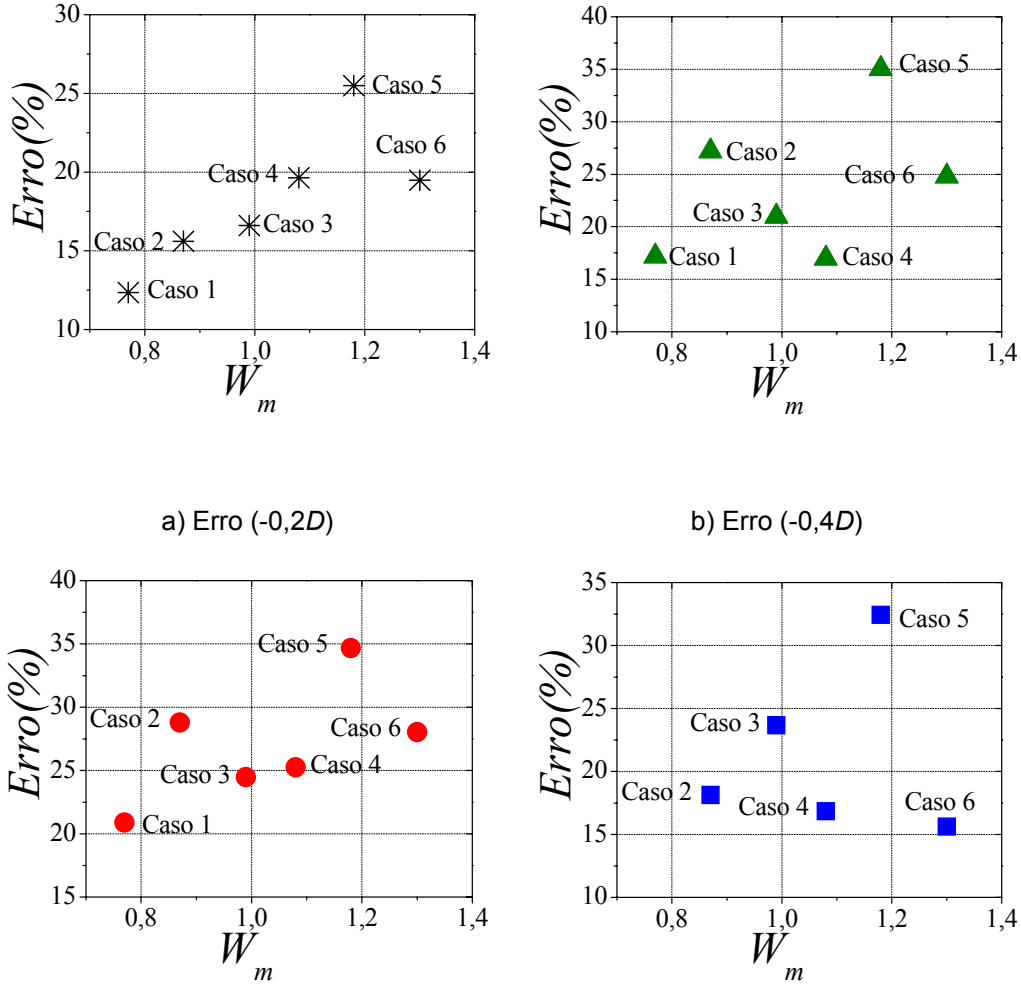
Para avaliar os erros referentes ao componente vertical de velocidade, foi necessário modificar a definição do erro, já que estas velocidades são muito

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

pequenas. Neste caso, o erro foi normalizado com os valores máximo e mínimo dos dados experimentais, de acordo com

$$Erro(\%) = \frac{\sum \left| V_{\exp} - V_{num} \right|}{N \left| V_{\exp - máx} - V_{\exp - \min} \right|} \times 100\% \tag{5.8}$$

Analisando os erros correspondentes ao componente vertical de velocidade apresentados nas Figs. 5.38 e 5.39 não é possível classificar os resultados como sendo bons para algum caso em particular. Os erros variam muito, desde 7,77% a 35,04% para o Caso 5. De um modo geral, o Caso 5 apresentou os piores resultados



a) Erro (-0,2*D*) b) Erro (-0,4*D*)

c) Erro (-0,6*D*) d) Erro (-0,8*D*)

Figura 5.38- Erro Relativo da velocidade vertical nas linhas a jusante

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

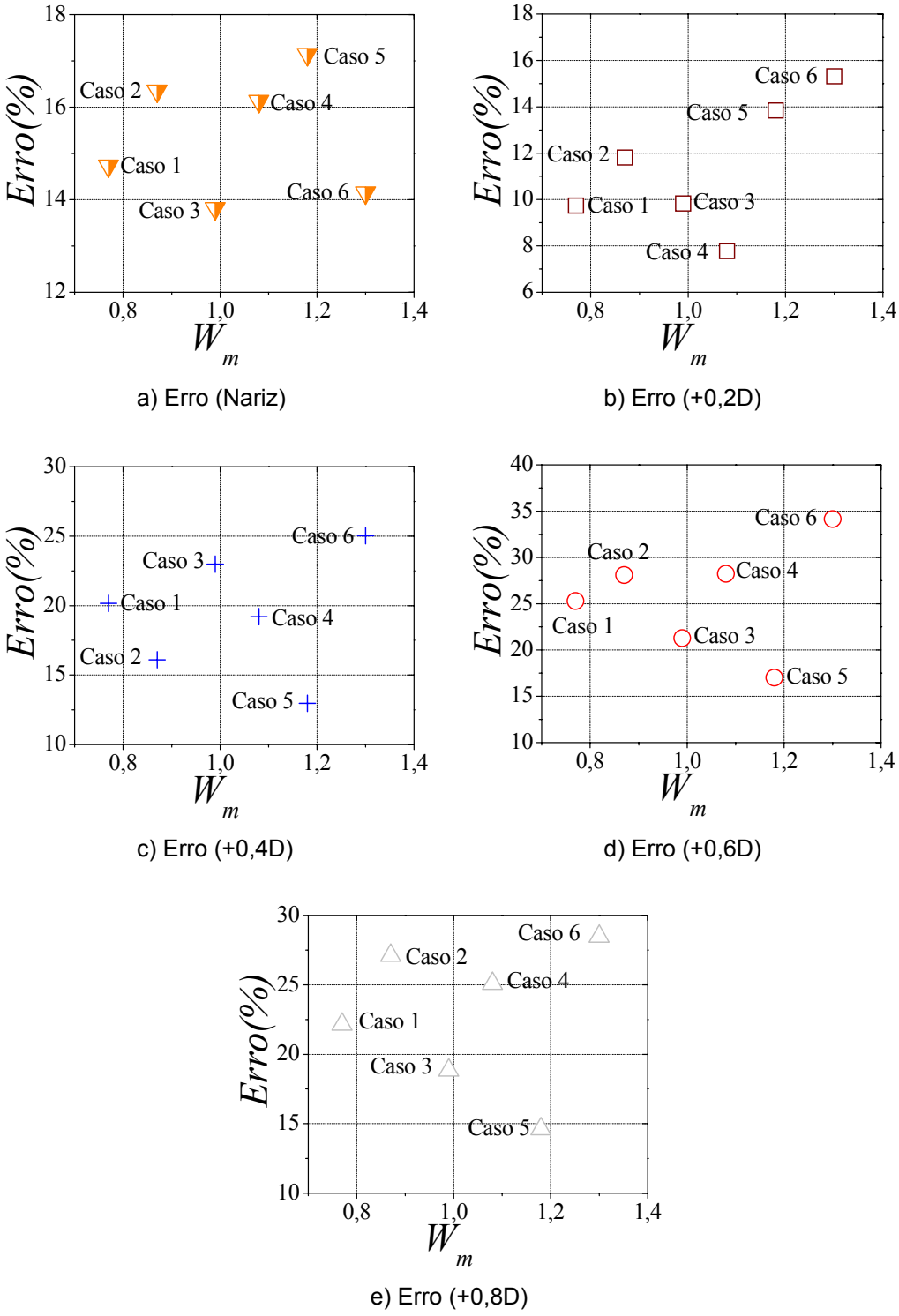


Figura 5.39- Erro Relativo da velocidade vertical nas linhas a montante

Como observado anteriormente, os melhores resultados para o componente vertical encontram-se nas coordenadas mais próximas ao nariz da bolha, tanto a montante como a jusante. A falta de concordância entre os dados experimentais e numéricos na região da golfada (a montante da bolha) pode ser atribuída à

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

ausência no modelo numérico das perturbações próprias de uma golfada líquida, a qual é afetada pela bolha que viaja a sua frente.

A partir dos resultados de erros, observou-se que os Casos 1 e 2 apresentaram os maiores espalhamentos com relação aos erros do componente axial de velocidade. Estes dois casos possuem as menores velocidades de mistura. Por outro lado, para o componente vertical, o Caso 5, com alta velocidade de mistura, foi o caso que apresentou os maiores erros.

Visando identificar a causa das discrepâncias, identificou-se no Mapa de padrões, Fig. 5.7, os casos do Grupo 1 em vermelho e os casos do Grupo 2 em preto. Todos os casos localizam-se aproximadamente na interseção de bolha alongada e golfada. Novamente, não foi possível identificar alguma característica especial no grupo que apresentou melhores resultados, pois apesar dos Casos 2 e 3 possuírem a mesma velocidade superficial de gás, o Caso 6 possui velocidade superficial mais elevada.

A única característica comum dos casos do Grupo 1, consiste em apresentarem as menores razões entre as velocidade superficiais $w_{sg/} w_{sl}$, conforme pode ser observado na Tabela 5.3. No entanto, o Caso 1 é bem pior que os Casos 2, 3 e 6, e a razão w_{sg} / w_{sl} é somente ligeiramente maior que a do Caso 6. De qualquer forma, este fator, associado com as diversas observações realizadas, parece o principal causador das discrepâncias entre os resultados.

5.2.10
Tensão Cisalhante na Parede

As simulações tri-dimensionais de uma golfada são muito úteis para auxiliar na interpretação do fenômeno físico. Porém, uma outra utilidade deste tipo de simulação consiste em calibrar modelos uni-dimensionais para prever este padrão de escoamento. Em muitas aplicações práticas, as tubulações possuem muitos quilômetros de comprimento, inviabilizando as simulações tri-dimensionais. A solução consiste em determinar somente as grandezas médias nas seções transversais, empregando modelos uni-dimensionais. No entanto, estes modelos precisam de relações de fechamento que consistem nas tensões cisalhantes nas paredes e na interface entre as fases. Dessa forma, apesar de não haver dados experimentais disponíveis para estas grandezas, nesta seção investigou-se a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

distribuição de tensão cisalhante nas paredes do duto, a qual pode ser facilmente determinada, a partir do campo de velocidade.

Como apresentado no Capítulo 3, a tensão cisalhante nas paredes é determinada baseada na lei da parede, em função do valor da energia cinética turbulenta do primeiro ponto interno próximo às paredes, de acordo com

$$\tau_S = \rho\, C_\mu\, \kappa^2 \tag{5.9}$$

A tensão cisalhante na parede τ_S é comparada a seguir com a tensão cisalhante, obtida com o código unidimensional desenvolvido para predizer o regime de golfadas (Ortega, 2004; Carneiro, 2005), baseado no Modelo de Dois Fluidos. Analisou-se somente a tensão cisalhante entre a parede e o líquido e somente para os casos do Grupo 1 (Casos 2, 3 e 6), os quais apresentaram melhor concordância com os dados experimentais.

O modelo uni-dimensional determina somente grandezas médias nas áreas das seções transversais ao longo do duto, logo a velocidade média do líquido $\overline{W_l}$ e a fração volumétrica média $\overline{\alpha}$ são

$$\overline{W_l} = \frac{1}{A}\int_A W_l\, dA \quad ; \quad \overline{\alpha} = \frac{1}{A}\int_A \alpha\, dA \tag{5.10}$$

onde o subscrito *l* denota a fase líquida.

A tensão cisalhante na parede é calculada a partir de uma correção empírica para o fator de atrito *f*, o qual é definido por Speeding e Hand (1997) para escoamento turbulento líquido-gás, como segue

$$\tau = \frac{1}{2} f_l\, \rho_l\, \overline{W_l}^2 \quad ; \quad f_l = 0{,}0262\left(\overline{\alpha}\,\mathrm{Re}_l^s\right)^{-0{,}139} \tag{5.11}$$

$$\mathrm{Re}_l^s = \frac{\rho_l\, W_{sl}\, D_{hl}}{\mu_l} \quad ; \quad D_{hl} = \frac{4\, A_l}{S_l} \tag{5.12}$$

onde D_{hl} é o diâmetro hidráulico, calculado em função da área transversal de líquido A_l e perímetro molhado de líquido S_l.

O modelo unidimensional prevê a formação das golfadas em um regime estatisticamente permanente ao longo do duto. A Figura 5.40 apresenta a fração

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

volumétrica da água ao longo da tubulação para diferentes instantes de tempo, obtida com o programa uni-dimensional, com as condições de operação do Caso 6. Pode-se observar que as golfadas variam de comprimento ao longo do duto e com o tempo. Para ser possível comparar a distribuição de tensões ao longo de uma golfada unitária é preciso selecionar uma golfada unitária.

A tensão de cisalhamento do modelo unidimensional foi obtida como uma média dos valores para cada unidade básica de golfada selecionada para sua análise. O critério de seleção das unidades básica de golfada foi baseado nos comprimentos da bolha e comprimentos de golfada líquida, tendo por objetivo observar se a variação no comprimento destas afetava o valor da tensão de cisalhamento. Para o Caso 6, por exemplo, foram eleitas as golfadas que aparecem com linha vermelha na Fig. 5.40.

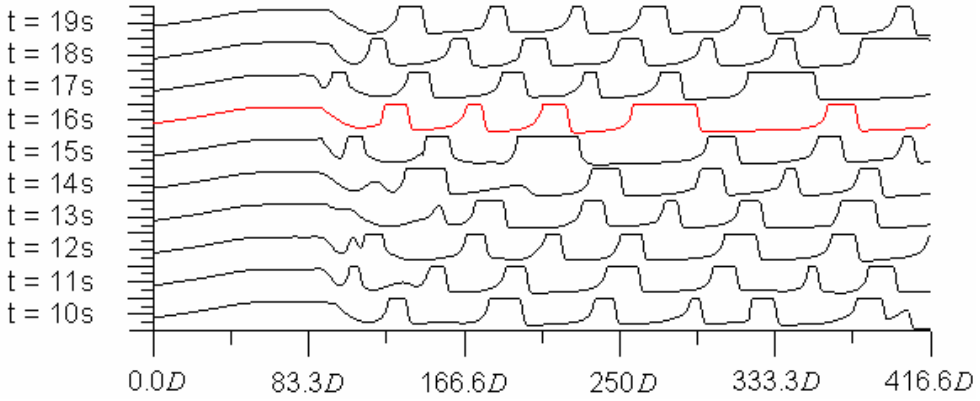


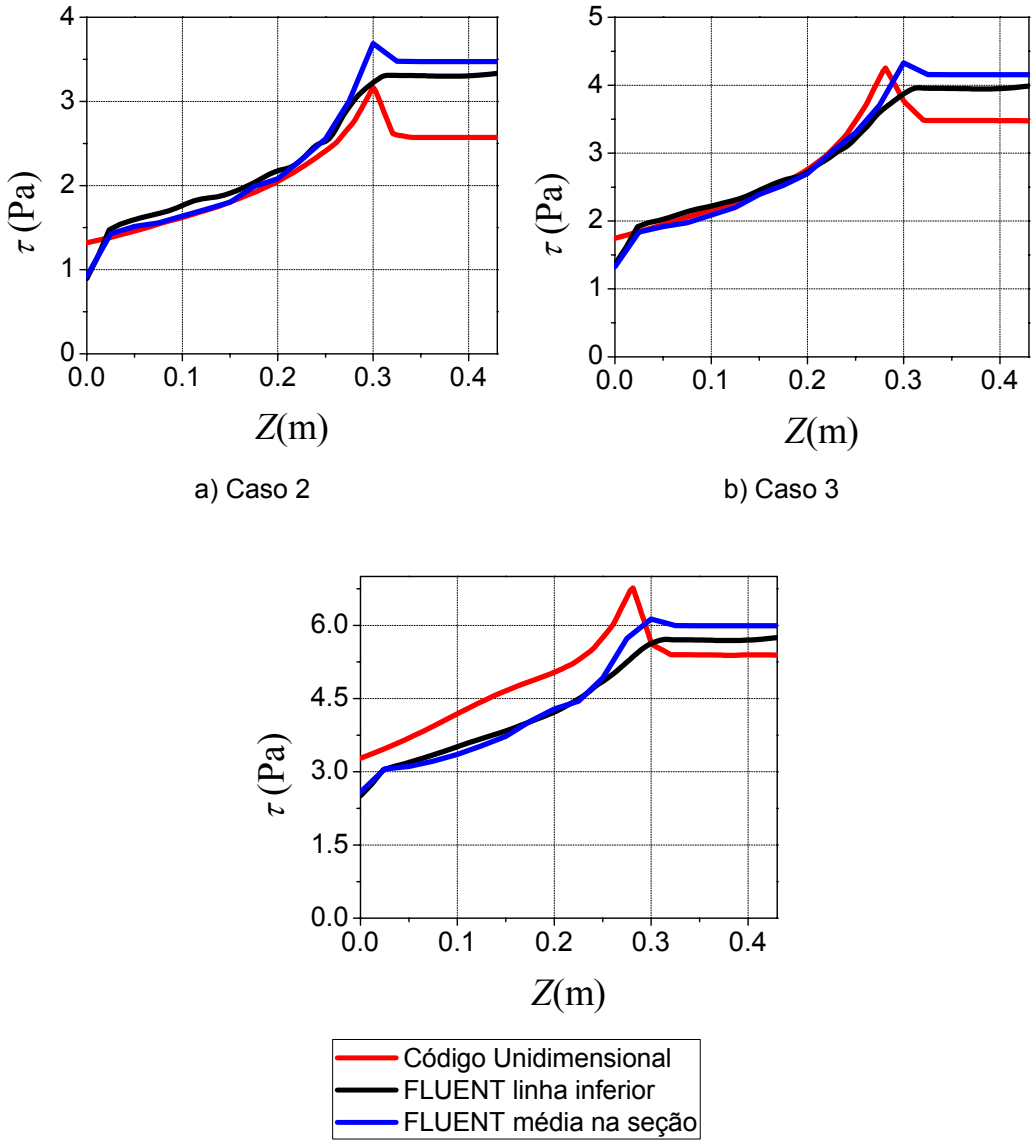
Figura 5.40- Variação da fração volumétrica com o tempo ao longo do duto, Modelo 1D. Caso 6

Para sua comparação com os dados obtidos do FLUENT™, colocou-se um referencial na ponta da bolha destas golfadas e considerou-se que dito referencial estava localizado na metade axial da tubulação, então a leitura das tensões cisalhantes foi realizada 0,30m a montante e -0,30m a jusante do nariz da bolha. Similar processo foi utilizado num instante de tempo distinto ao primeiro e foi feita uma média de todas as unidades de golfada, obtendo-se o mostrado na Fig. 5.40 em cor vermelho

A partir dos dados do FLUENT™, calculou-se a tensão cisalhante de duas formas. Na primeira, utilizou-se a expressão dada pela Eq. 5.9, e avaliou-se a tensão ao longo de uma linha na base da tubulação, no eixo central. Esta distribuição de tensão é apresentada na Fig. 5.41 com a cor preta. A segunda

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

forma de avaliar a tensão utilizando os dados do FLUENT™, consistiu em avaliar a média da tensão local (ao longo do perímetro molhado) em cada seção transversal. Esta tensão encontra-se definida como "tensão média na seção" na Fig. 5.41.



a) Caso 2 b) Caso 3

c) Caso 6

Figura 5.41- Tensão de cisalhamento na parede para os Casos 2, 3 e 6. Grupo 1.

Analisando as distribuições de tensão cisalhante ao longo do duto na Fig. 5.41, pode-se notar que as mesmas tendências foram obtidas com as três formas de avaliar a tensão, com mesma inclinação na região da bolha, sendo constante na região da golfada. Note que na região da golfada, todos os modelos apresentaram a tensão aproximadamente constante, o que é coerente com a discussão anterior de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

que o escoamento nesta região se comporta como desenvolvido. O modelo 1D prevê um pico de tensão no nariz da bolha (cauda da golfada), o qual pode estar associado com a redução brusca da fração volumétrica de gás para zero na formação da golfada, o que induz um aumento da velocidade do líquido. Os Casos 2 e 3 apresentam excelente concordância entre o modelo 1D e a tensão na base do duto na região da bolha, porém, como a queda de tensão na cauda da golfada não é prevista pelo FLUENT, o patamar de tensão cisalhante na região do pistão de líquido é deslocado para cima. O Caso 6, que possui maior velocidade superficial de gás, apresenta as mesmas tendências, com um deslocamento constante de tensão ao longo de todo o duto.

A diferença observada entre a tensão média calculada com o FLUENT e a tensão do modelo 1D (melhor visto na Fig. 5.41(c)) está relacionada ao fato de que a fração volumétrica média na seção no filme líquido do modelo tridimensional é inferior a aquele calculado pelo modelo unidimensional, como pode ser observado na Fig. 5.42.

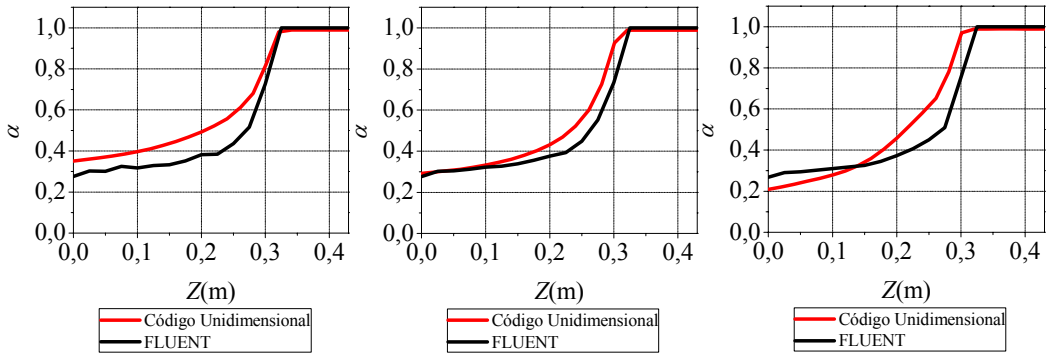


Figura 5.42- Fração volumétrica na seção axial para os Casos 2, 3 e 6. Grupo 1

Com o objetivo de avaliar a não uniformidade da tensão cisalhante do líquido ao longo da parede, apresenta-se a seguir a distribuição da tensão cisalhante ao longo do perímetro molhado S_l em diversas sessões transversais. A Figura 5.43 ilustra esquematicamente o perímetro molhado do líquido. A distribuição de tensão é traçada a partir da interface até o ponto inferior do duto.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

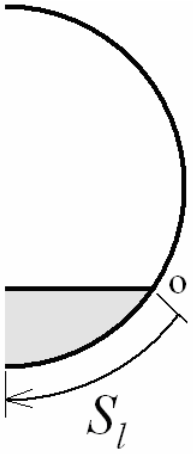


Figura 5.43- Perímetro molhado da fase líquida

As Figuras 5.44, 5.45 e 5.46, correspondem aos Casos 2, 3 e 6, respectivamente e apresentam a tensão de cisalhamento ao longo do perímetro para diversas seções transversais. As figuras da esquerda correspondem a posições longe do nariz da bolha e as da direita correspondem às coordenadas próximas do nariz da bolha. Analisando as três figuras observa-se que em todos os casos e em todas as seções transversais a tensão é máxima na base do duto, o que explica o deslocamento entre as curvas de tensão local da base do duto e a tensão média apreciada na Fig. 5.41. Observa-se ainda um aumento gradativo do nível de tensão ao longo da bolha, como também observado na Fig. 5.41. Observa-se uma oscilação da tensão ao longo do perímetro nas coordenadas iniciais da tubulação, na região próxima à interface. Nota-se ainda que nestas coordenadas iniciais um agrupamento das tensões na altura da interface.

Devido à penetração do filme líquido na parte superior da bolha, observa-se para todos os casos, que na coordenada 0,300m, o líquido molha todo o perímetro do duto, criando um filme em volta da bolha de gás como mostrado na Fig. 5.47. Nesta coordenada, o maior valor da tensão de cisalhamento na parede é máximo na parte superior do tubo. Quando existe penetração de líquido na parte superior, devido à pequena espessura do mesmo, a tensão cisalhante cresce substancialmente. Note que o Caso 6 também apresenta um filme de líquido molhando toda a periferia do duto em 0,275 m (Fig. 5.47a), como resultado, a tensão cisalhante nesta coordenada cresceu significativamente na parte superior da tubulação. A oscilação da tensão observada nesta coordenada pode ser devido a incertezas associadas com a pequena espessura do filme nesta coordenada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA

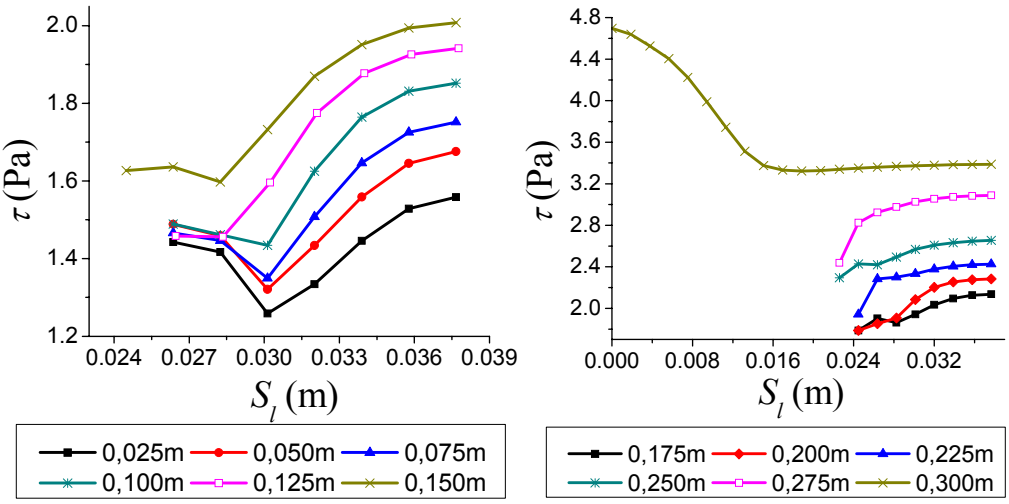


Figura 5.44- Tensão cisalhante nos perímetros molhados para o Caso 2

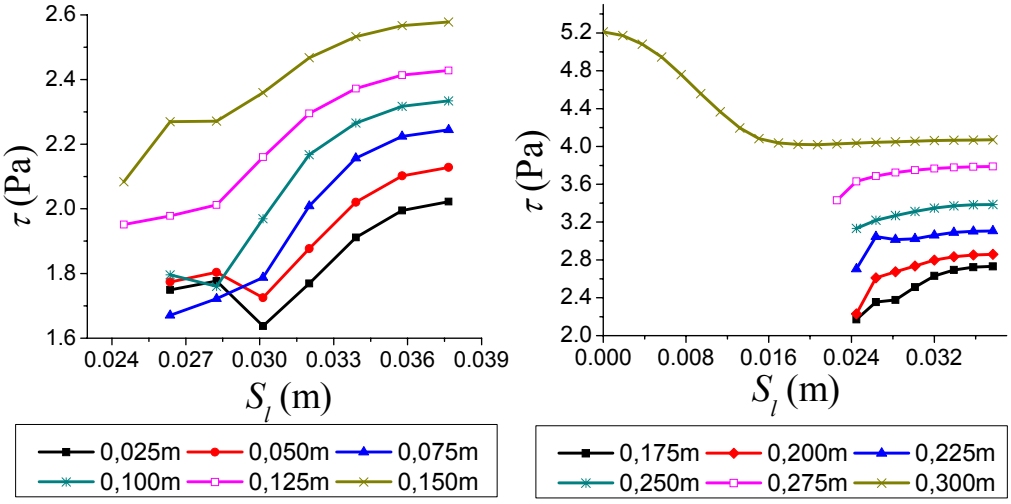


Figura 5.45- Tensão cisalhante nos perímetros molhados para o Caso 3

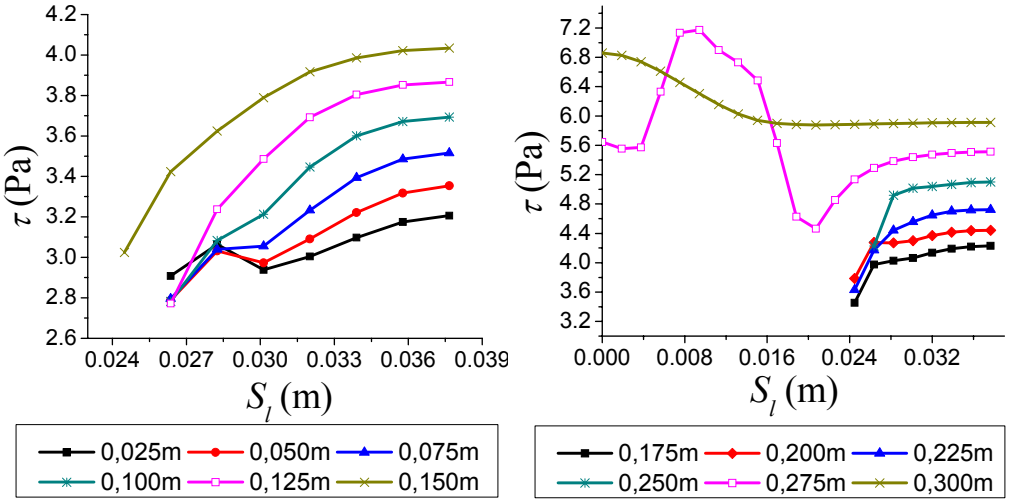
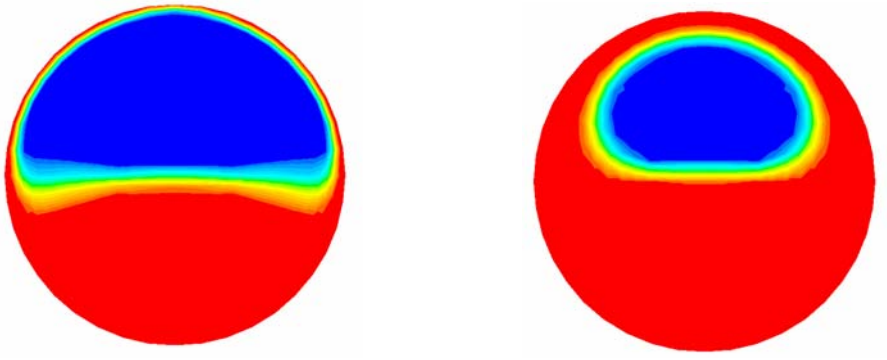


Figura 5.46- Tensão cisalhante nos perímetros molhados para o Caso 6

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA



a) 0,275m b) 0,300m

Figura 5.47- Contorno de fração volumétrica para o Caso 6 nas coordenadas 0,275m e 0,300m

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721412/CA