# 5 Análise de Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais, de diferentes técnicas, obtidos no escoamento ascendente de uma bolha de Taylor, em tubulação vertical. Primeiro, os resultados do escoamento utilizando a técnica *LIF* com Rodamina líquida e em seguida utilizando-se simplesmente a técnica de *PIV e LIF* em uma solução de água destilada e glicerina com partículas fluorescentes. Por último a análise com a técnica combinada de *PIV*, *LIF* e *PST* em uma mistura de água destilada e glicerina em diferentes concentrações, abrangendo o regime laminar e turbulento.

### 5.1. Determinação da forma da bolha com solução de Rodamina líquida

Primeiramente, foi realizado um estudo qualitativo para visualizar e identificar o formato da bolha utilizando a técnica de fluorescência induzida por laser (*LIF*) com uma solução de água destilada com Rodamina líquida. Foram realizados testes experimentais com uma concentração de 50 microgramas de Rodamina líquida por litro de água.

A Rodamina é uma substância fluorescente, que quando iluminada por um laser, emite luz em um comprimento de onda maior. A utilização de um filtro ótico bloqueia a reflexão intensa da luz do laser na interface líquido-gás, permitindo assim que a câmera CCD capture uma imagem com a forma da bolha. A figura 5.1 apresenta a imagem adquirida de uma pequena bolha de Taylor e as figuras 5.2 a 5.4 uma seqüência de fotos tiradas de uma bolha de Taylor alongada.

Pode-se observar na figura 5.4 que a base da bolha é instável com movimentos assimétricos em relação ao eixo do tubo. A presença de pequenas bolhas acompanhando o escoamento resulta em reflexões de luz, produzindo imagens com baixa qualidade.

O uso da Rodamina líquida se mostrou interessante para obter o formato da bolha, porém não oferece informações para o cálculo do campo de velocidades na fase líquida ao redor da bolha.



Figura 5.1 – Pequena bolha de Taylor em solução de água e Rodamina líquida.



Figura 5.2 – Nariz da bolha de Taylor em solução de água e Rodamina líquida.



Figura 5.3 – Bolha de Taylor em solução de água e Rodamina líquida.



Figura 5.4 – Esteira da bolha de Taylor em solução de água e Rodamina líquida.

### 5.2. Resultados utilizando a técnica de PIV e LIF

Hishida et al. (2001) perceberam que a intensidade da luz refletida pela superfície das bolhas (interface líquido-gás) saturava a câmera CCD, inibindo desta forma a luz refletida pelas partículas na vizinhança das bolhas, conforme pode ser observado na figura 5.5. Os autores utilizaram a técnica de *LIF* adicionando ao fluido partículas fluorescentes. Um filtro ótico foi usado para deixar a câmera CCD ser sensibilizada apenas pela luz refletida pelas partículas.



Figura 5.5 – Imagem saturada pela luz refletida pela superfície das bolhas (Fonte: Hishida et al., 2001).

A seguir será realizada uma análise qualitativa da utilização da técnica de *PIV* e *LIF* utilizadas simultaneamente na caracterização de escoamentos bifásicos.

Foram acrescentadas ao fluido partículas fluorescentes (Marca: *Flashe* e fabricante: *Lefranc & Bourgeois*). Foi utilizado como fluido de teste uma solução em peso de 75% de glicerina e 25% de água destilada.

A figura 5.6 apresenta a imagem adquirida do nariz da golfada, em escoamento ascendente. Após o processamento, partículas não correlacionadas resultam na presença de vetores espúrios (vetores que, em relação aos seus vizinhos, são muito diferentes em magnitude ou direção) dentro da bolha, figura 5.7. Devido à reflexão, ruídos dentro da bolha são correlacionados durante o processamento. Para remover estes vetores é feito visualmente, no programa *Insight* 3G<sup>®</sup>, uma máscara na interface líquido-gás para desconsiderar a região

dentro da bolha, figura 5.8. Como a interface não é bem definida, um grande erro é cometido na delimitação visual da máscara. O resultado do processamento com a máscara criada com a provável interface líquido-gás é apresentado na figura 5.9. Os campos de velocidade são apresentados na figura 5.10.

A técnica de *PIV* semeada com partículas fluorescentes e com uso de filtros óticos possibilitou a determinação do campo de velocidades na fase líquida ao redor da bolha de Taylor, perto da parede do tubo e da interface gás-líquido. Entretanto, esta técnica não é apropriada para determinar a posição exata da interface líquido-gás e, conseqüentemente, a forma das bolhas. Os filtros óticos não cortam completamente as reflexões do laser nas interfaces, além disso, não evitam que algumas imagens de partículas fluorescentes apareçam dentro da bolha e próximas às interfaces.



Figura 5.6 – Imagem adquirida com a técnica *PIV* e *LIF* ( $\mu$  = 0,027 Pa.s).



Figura 5.7 – Processamento sem máscara retornando vetores espúrios dentro da bolha.



Figura 5.8 – Máscara desenhada visualmente na interface líquido-gás provável.



Figura 5.9 – Processamento da imagem com máscara.



Figura 5.10 – Campo de velocidades no nariz da golfada.

### 5.3. Resultados das técnicas de *PIV, LIF* e *PST* simultâneas.

As técnicas de *PIV*, *LIF* e *PST*, aplicadas simultaneamente, foram usadas no estudo do campo de velocidades no nariz, na região anular e na esteira de uma bolha de Taylor em ascensão numa tubulação vertical com líquido estagnado. Os fluidos de teste utilizados nas medições foram uma concentração, em peso, de 80% de glicerina e 20% de água destilada e outra de 50% de glicerina e 50% de água destilada, abrangendo assim o regime laminar e turbulento, conforme será visto posteriormente.

### 5.3.1. Resultados no nariz da bolha

Foi estudado o campo de velocidades à frente e na região anular de uma bolha de Taylor em ascensão numa tubulação vertical com líquido estagnado. Os valores do Número de Reynolds, Re<sub>B</sub>, foram calculados com base na velocidade da bolha, U<sub>B</sub>, em condições de líquido estacionário,

$$\operatorname{Re}_{B} = \frac{\rho U_{B} D}{\mu}$$
(5.1)

onde D é o diâmetro interno do tubo,  $\rho$  a massa específica do fluido e  $\mu$  viscosidade do líquido.

A tabela 5.1 apresenta um resumo das variáveis experimentais para o fluido de teste utilizado uma concentração em peso de 80% de glicerina e 20% de água destilada. O valor do Número de Reynolds, Re<sub>B</sub>, para essas condições experimentais é igual a 135 (regime laminar).

μ	0,043	Pa.s
ρ	1206,8	kg/m3
Т	20	S
U <sub>B</sub>	0,178	m/s

Tabela 5.1 – Dados experimentais para solução de 80% glicerina e 20% água destilada.

Para se obter a máscara com o formato da bolha o processamento das imagens passa por algumas etapas. O *software* ImageJ (versão 1.37. Disponível

em http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html. Acesso em 11 de maio de 2007) foi utilizado no processamento das imagens para obter a máscara digital.

São selecionadas duas imagens, uma somente com a iluminação de fundo (figura 5.11), sem bolha, e a outra do nariz da bolha (figura 5.14). São aplicados dois filtros da mediana nas imagens, sendo o primeiro de 5x5 *pixels* (figuras 5.12 e 5.15), para retirar as partículas, e o segundo de 7x7 *pixels* (figuras 5.13 e 5.16) para realçar a interface líquido-gás.



Figura 5.11 – Imagem do tubo obtida com o PIV, LIF e PST.



Figura 5.12 – Imagem do tubo após filtro de mediana de 5x5 *pixels*.



Figura 5.13 – Imagem do tubo após filtro de mediana de 7x7 *pixels*.



Figura 5.14 – Imagem do nariz da bolha de Taylor obtida com o PIV, LIF e PST ( $Re_B = 135$ ).



Figura 5.15 – Imagem do nariz da bolha de Taylor após filtro de mediana de 5x5 pixels ( $Re_B = 135$ ).



Figura 5.16 – Imagem do nariz da bolha de Taylor após filtro de mediana de 7x7 *pixels* ( $Re_B = 135$ ).

Após as imagens do tubo e da bolha terem passado pelos dois filtros de mediana de 5x5 e 7x7 *pixels* (figuras 5.13 e 5.16) é feita a subtração das duas imagens. A figura 5.17 apresenta o resultado desta operação. A tubulação, fluido e área externa somem da imagem, restando apenas o contorno da bolha de Taylor.

A partir do resultado da operação de subtração é feita a binarização do resultado da subtração, isto é, converter a imagem para preto e branco (figura 5.18). Esta etapa visa separar a bolha do liquido. Em seguida é realizado o preenchimento do interior da bolha e a limpeza de pequenos pontos fora da área de interesse (figura 5.19). Este processo atribui para área branca, em níveis de cinza, valor igual a 255 e para a região preta valor zero. A máscara digital é igual à Figura 5.19, porém com valores invertidos, isto é, a área branca (fundo) tem valor zero e a área preta (bolha) valor 255. Essa última etapa é necessária, pois o software utilizado para o processamento *PIV* reconhece o valor de 255 como máscara.



Figura 5.17 – Resultado da subtração das imagens após o filtro de mediana de 7x7 pixels (Re<sub>B</sub> = 135).



Figura 5.18 – Binarização da subtração ( $Re_B = 135$ ).



Figura 5.19 – Máscara digital do nariz da bolha de Taylor ( $Re_B = 135$ ).

As imagens originalmente possuem 12 *bits* (4096 níveis de cinza), porém o processo de binarização converte-as para 8 *bits* (256 níveis de cinza). É necessário transformá-la para 12 *bits* por questões de compatibilidades com os *softwares*.

Para o processamento das imagens de *PIV* foi utilizado o seguinte ajuste dos algoritmos de correlação cruzada: *Hart Correlator* (algoritmo de correlação de imagens) e *Gaussian Peak* (algoritmo para localização do pico de correlação). O tamanho da janela de correlação usado no processamento foi inicialmente de 64x64 *pixels* e depois reduzido para 32x32 *pixels*. Nas figuras 5.20 e 5.22 são apresentados os resultados do processamento do *PIV* com a utilização da máscara obtida anteriormente. As figuras 5.21 e 5.23 apresentam os campos de velocidades usando o programa de pós-processamento *TecPlot*<sup>®</sup>, versão 10.

Pode-se observar que tanto o processamento com janela de interrrogação de 64x64 *pixels* como a de 32x32 *pixels* apresentaram resultados com boa resolução.

Os mapas com o campo de velocidade à frente da bolha de Taylor usam a tubulação como referencial. A origem da coordenada axial z é no nariz da bolha

e é positivo para cima. Conforme vemos nas figuras, a bolha de ar desloca o líquido à sua frente e os vetores perto da interface, ligeiramente abaixo do topo, mostram um forte efeito radial. Desta forma, o líquido escoa para a região anular dando passagem para a bolha. Este efeito pode ser visto nas figuras 5.21 e 5.23. Como a espessura da película de líquido decresce significativamente, a diminuição na área de escoamento deve ser balanceada pelo aumento na velocidade do escoamento, assumindo o mesmo escoamento volumétrico. A máxima velocidade do líquido na direção axial, em uma dada seção, se aproxima da interface até que a espessura da película,  $\delta$ , se torne constante e o escoamento na película se torne completamente desenvolvido. Então a velocidade radial na película é zero e o campo de velocidades não se altera mais.



Figura 5.20 – Processamento com janela de 64x64 *pixels* e máscara digital ( $Re_B = 135$ ).

91



Figura 5.21 – Campo de velocidades do nariz da bolha de Taylor com 64x64 *pixels* ( $Re_B = 135$ ).



Figura 5.22 – Processamento com janela de 32x32 *pixels* e máscara digital ( $Re_B = 135$ ).



Figura 5.23 – Campo de velocidades do nariz da bolha de Taylor com 32x32 *pixels* ( $Re_B = 135$ ).

Foi realizado também um estudo de golfada em ascensão com líquido estagnado para uma concentração, em peso, de 50% de glicerina e 50% de água destilada. A tabela 5.2 apresenta o resumo das variáveis experimentais. O valor do Número de Reynolds, Re<sub>B</sub>, para essas condições experimentais é igual a 1102.

μ	0,005	Pa.s
ρ	1129	kg/m3
Т	20	S
U <sub>B</sub>	0,179	m/s

Tabela 5.2 – Dados experimentais para solução de 50% glicerina e 50% água destilada.

Com a mesma metodologia empregada anteriormente é obtida a máscara digital da bolha. A figura 5.24 apresenta a imagem do nariz da bolha de Taylor adquirida com informações tanto de *PIV/LIF* como de *PST*. São aplicados os filtros de mediana de 5x5 e 7x7 *pixels*. A figura 5.25 apresenta a máscara digital

obtida após a binarização do resultado da subtração entre as imagens filtradas da bolha e apenas do tubo.



Figura 5.24 – Imagem do nariz da bolha de Taylor obtida com o *PIV*, *LIF* e *PST* ( $Re_B = 1102$ ).



Figura 5.25 – Máscara digital do nariz da bolha de Taylor (Re $_{\rm B}$  = 1102).

Pode-se observar que tanto o processamento com janela de interrrogação de 64x64 *pixels* (figura 5.26) como a de 32x32 *pixels* (figura 5.27) apresentaram resultados com boa resolução.



Figura 5.26 – Campo de velocidades do nariz da bolha de Taylor com 64x64 *pixels* (Re<sub>B</sub> = 1102).



Figura 5.27 – Campo de velocidades do nariz da bolha de Taylor com 32x32 *pixels* ( $Re_B = 1102$ ).

A figura 5.28 mostra o campo de velocidades na película líquida na região anular entre a golfada e o tubo, para as duas concentrações de fluidos estudas anteriormente, para  $Re_B = 135$  e  $Re_B = 1102$ . A componente axial da velocidade aumenta até que a película líquida fique completamente desenvolvida e a espessura ( $\delta$ ) se torna constante.

Brown (1965) citado em Nogueira et al. (2006) deduziu uma expressão teórica para o perfil de velocidades no filme líquido (desenvolvido) ao redor de uma bolha de Taylor fluindo concomitantemente com o líquido, onde  $u_z$  é a componente axial da velocidade dada por:

$$u_{z} = \frac{g}{v} \left[ \frac{R^{2} - r^{2}}{4} - \frac{(R - \delta)^{2}}{2} \ln \frac{R}{r} \right]$$
(5.2)

sendo a espessura da película líquida ( $\delta$ ) estimada por:

$$\delta = \left[\frac{3\nu}{2g(R-\delta)}((R-\delta)^2 U_B - R^2 U_L\right]^{1/3}$$
(5.3)

onde v é a viscosidade cinemática do fluido,  $U_B$  a velocidade da bolha e  $U_L$  a velocidade média do líquido bombeado (no presente trabalho o fluido é estacionário, logo  $U_L$  é igual a zero).

A figura 5.29 apresenta a velocidade axial na película líquida. Os dados experimentais (pontos cheios) representam a média de 6 perfis de velocidade ao longo da película líquida desenvolvida. A linha tracejada representa o perfil de velocidade teórico calculado pela equação 5.2 com espessura da película estimada pela equação 5.3.

Na ausência de atrito na interface líquido-gás, a tensão de cisalhamento  $(\tau_w)$  na parede do tubo suporta toda a força de campo na película de líquido, tal que:

$$\tau_{w} = \frac{\delta(2R - \delta)}{2R} \rho g \tag{5.4}$$

onde  $\delta$  é a espessura da película líquida, R o raio do tubo, g a aceleração da gravidade e  $\rho$  a massa específica do fluido.

No escoamento com  $Re_B = 135$  o valor da espessura no filme líquido foi de 2,4 mm e o valor estimado foi de 2,2 (diferença de 9%). No escoamento com  $Re_B = 1102$  o valor de espessura foi de 1,9 mm e o valor estimado foi de 1,2 (diferença de 58%).

A tensão de cisalhamento ( $\tau=\mu$ .du/dr, onde  $\mu$  é a viscosidade e du/dr é o gradiente de velocidade axial pelo raio) foi calculada e extrapolada para a parede do tudo. O valor da tensão de cisalhamento na parede do tudo para Re<sub>B</sub> = 135 foi de 22,3 Pa e o previsto era 24,0 Pa (diferença de 8%). Para Re<sub>B</sub> = 1102 foi de 9,5 Pa e o previsto era 12 Pa (diferença de 26%). Os resultados mostraram uma diminuição na tensão de cisalhamento para líquidos com menor viscosidade (valores de Re<sub>B</sub> maiores).

Para baixos valores de Re<sub>B</sub>, os dados experimentais tiveram boa correlação com a equação de Brown. Os desvios são particularmente significantes para altos valores de Re<sub>B</sub>. A mesma conclusão pode ser feita com relação à espessura da película líquida (Nogueira et al. 2006).



Figura 5.28 – Campo de velocidades na película líquida: (a)  $Re_B = 135 e$  (b)  $Re_B = 1102$ .



Figura 5.29 – Velocidade axial na película líquida.

#### 5.3.2. Resultados na esteira da bolha

Campos et al. (1988) estudaram o escoamento na esteira da bolha de Taylor e identificaram três diferentes tipos de regime de escoamento: laminar, transição e turbulento. Para bolhas suficientemente longas, os tipos de padrão de escoamento na esteira da bolha, em líquido estagnado, dependem somente

do parâmetro adimensional, N<sub>f</sub>, definido por:

$$N_f = \frac{g^{1/2} D^{3/2} \rho}{\mu}$$
(5.5)

onde g é a aceleração da gravidade, D o diâmetro interno do tubo,  $\rho$  a massa específica do fluido e  $\mu$  viscosidade do líquido. Foi observado o escoamento laminar na esteira da bolha para valores de  $N_f$  menores que 500, o padrão de transição no intervalo entre 500 e 1500 e o regime turbulento para valores de  $N_f$  acima de 1500.

Para estudar o escoamento na esteira da bolha é aplicada a mesma metodologia anteriormente descrita, no estudo do escoamento no nariz da bolha.

A seguir é apresentado o estudo na esteira da bolha para um fluido de teste com uma concentração em peso de 80% de glicerina e 20% de água destilada. A tabela 5.1 apresenta um resumo das variáveis experimentais do problema.

A figura 5.30 mostra a sombra da base da bolha de Taylor escoando em uma solução viscosa, Nf = 390 (regime laminar). Uma leve depressão côncava é observada na base da bolha. A região côncava da bolha é encoberta pela projeção bidimensional da sombra no plano da imagem, escondendo o campo de velocidades no seu interior. Apesar disso foi possível obter alguns vetores de velocidade nesta região.

As figuras 5.31 e 5.32 mostram a imagem da esteira da bolha após os filtros de mediana de 5x5 e 7x7 *pixels*, respectivamente. Após os filtros a imagem é subtraída (figura 5.33) daquela somente com o tubo e em seguida binarizada (figura 5.34) e preenchida para criação da máscara digital (figura 5.35).

No caso do escoamento laminar, é preciso desenhar a base da bolha para não perdermos os vetores de deslocamento dentro da região côncava. Para isso carregamos no programa a máscara inversa (figura 5.36), isto é bolha visível e fundo preto.



Figura 5.30 – Imagem da esteira da bolha de Taylor obtida com o *PIV*, *LIF* e *PST* (Nf = 390).



Figura 5.31 – Imagem da esteira da bolha de Taylor após filtro de mediana de 5x5 *pixels* (Nf = 390).



Figura 5.32 – Imagem da esteira da bolha de Taylor após filtro de mediana de 7x7 *pixels* (Nf = 390).



Figura 5.33 – Resultado da subtração das imagens após o filtro de mediana de 7 *pixels* (Nf = 390).



Figura 5.34 – Binarização da subtração (Nf = 390).



Figura 5.35 – Máscara digital da esteira da bolha de Taylor (Nf = 390).



Figura 5.36 – Máscara inversa para desenhar base da bolha.

As figuras 5.37 e 5.39 mostram o campo de velocidades processados no *Insight* e as figuras 5.38 e 5.40 os vetores da esteira da bolha de Taylor no *software TecPlot*<sup>®</sup>. Nestas figuras pode-se observar que o escoamento em estudo é praticamente simétrico em torno de r/D = 0. Conforme foi comentado no estudo do nariz da bolha, o fluxo na película líquida no anular (bolha-tubo) possui um forte componente radial da velocidade, principalmente próximo à interface líquido-gás. Este fluxo ao chegar à base da bolha começa a desacelerar a fim de ocupar toda a seção do tubo. O fluido imediatamente abaixo da bolha escoa para cima. A interação dos dois escoamentos gera uma região de recirculação, a qual é caracterizada pela formação de um vórtice toroidal bem definido.

A origem da coordenada axial z é no nariz da bolha e é positiva para cima. A posição axial do centro do vórtice toroidal está aproximadamente em z/D = -0.22, enquanto a posição radial está em torno de r/D = 0.33.



Figura 5.37 – Processamento com janela de 64x64 pixels e máscara digital (Nf = 390).



Figura 5.38 - Campo de velocidades da esteira da bolha de Taylor com 64x64 pixels (Nf

104



Figura 5.39 – Processamento com janela de 32x32 pixels e máscara digital (Nf = 390).



Figura 5.40 – Campo de velocidades da esteira da bolha de Taylor com 32x32 *pixels* (Nf

Foi realizado também um estudo na esteira da bolha em ascensão com líquido estagnado para uma concentração, em peso, de 50% de glicerina e 50% de água destilada. A tabela 5.2 apresenta o resumo das variáveis experimentais.

A figura 5.41 apresenta a imagem da esteira da bolha de Taylor adquirida com informações tanto de *PIV/LIF* como de *PST*. São aplicados os filtros de mediana de 5x5 e 7x7 *pixels*. A figura 5.42 apresenta a máscara digital obtida após a binarização do resultado da subtração entre as imagens filtradas da bolha e apenas do tubo.

As figuras 5.43 e 5.44 mostram o campo de velocidades na esteira da bolha de Taylor. Conforme foi comentado no estudo do nariz da bolha, o fluxo na película líquida possui um forte componente radial da velocidade, principalmente próximo à interface líquido-gás. Este fluxo chegando ao final da bolha começa a desacelerar a fim de ocupar toda a seção do tubo.

Para o escoamento da bolha de Taylor, em líquido estagnado com baixa viscosidade,  $N_f = 3168$  (regime turbulento) a figura 5.43 o mostra um comportamento instável na esteira da bolha com oscilações tridimensionais em torno do eixo do tubo (r = 0), isto é, há líquido atravessando o plano de medição. Pode ser observada a presença de uma pequena bolha, resultando em vetores espúrios após o processamento do *PIV*. O campo de velocidades na esteira da bolha de Taylor é extremamente complexo e algumas regiões de recirculação podem ser observadas.



Figura 5.41 – Imagem da esteira da bolha de Taylor obtida com o PIV, LIF e PST (N<sub>f</sub> = 3168).



Figura 5.42 – Máscara digital da esteira da bolha de Taylor ( $N_f$  = 3168).



Figura 5.43 – Campo de velocidades da esteira da bolha de Taylor com 64x64 pixels (N<sub>f</sub>



Figura 5.44 – Campo de velocidades da esteira da bolha de Taylor com 32x32  $\it pixels$  (N<sub>f</sub>

## 5.3.3. Resultados de uma pequena golfada

Para estudar o escoamento em uma pequena bolha de Taylor é aplicada a mesma metodologia descrita anteriormente. A seguir é apresentado o estudo de uma pequena golfada em um fluido de teste com uma concentração em peso de 80% de glicerina e 20% de água destilada. A tabela 5.1 apresenta um resumo das variáveis experimentais para o fluido de teste.

Na imagem adquirida da pequena bolha de Taylor (figuras 5.45) são aplicados os filtros de mediana de 5x5 e 7x7 *pixels* (figuras 5.46 e 5.47). Após a subtração (figura 5.48) é realizada a binarização (figura 5.49) e em seguida o preenchimento para criação da máscara (figura 5.50).

Esta pequena bolha também apresentou uma região côncava na base da bolha, portanto foi utilizada a máscara inversa para podermos desenhada a base da bolha (figura 5.51).



Figura 5.45 – Imagem de uma pequena bolha de Taylor obtida com o *PIV*, *LIF* e *PST* ( $Re_B = 135$ ).



Figura 5.46 – Imagem da bolha de Taylor após filtro de mediana de 5x5 *pixels* ( $Re_B = 135$ ).



Figura 5.47 – Imagem da bolha de Taylor após filtro de mediana de 7x7 *pixels* ( $Re_B = 135$ ).



Figura 5.48 – Resultado da subtração das imagens após o filtro de mediana de 7 *pixels* ( $Re_B = 135$ ).



Figura 5.49 – Binarização da subtração ( $Re_B = 135$ ).



Figura 5.50 – Máscara digital da bolha de Taylor (Re\_B = 135).



Figura 5.51 – Aplicação da máscara inversa para desenhar base da bolha ( $Re_B = 135$ ).

As figuras 5.52 e 5.54 apresentam o campo de velocidades após o processamento *PIV* com janela de 64x64 *pixels* (figura 5.52) e com janela 32x32 *pixels* (figura 5.54).

Pode-se observar que no escoamento da região anular entre a bolha e o tubo a espessura da película líquida decresce significativamente, porém não tem comprimento suficiente para desenvolver o escoamento por completo. A espessura da película não atinge um valor constante. Para bolhas pequenas foi observado que a velocidade de escoamento é a mesma que para bolhas grandes. O escoamento está em regime laminar (Re<sub>B</sub> = 135).

Pode-se observar nas figuras 5.53 e 5.55 que o escoamento na esteira da bolha encontra-se em regime laminar (Nf = 390), apresentando um comportamento simétrico em torno de r/D = 0 e há a presença de um vórtice toroidal.



Figura 5.52 - Processamento com janela de 64x64 pixels e máscara digital (Nf = 390).



Figura 5.53 – Campo de velocidades da bolha de Taylor com 64x64 *pixels* (Nf = 390).



Figura 5.54 – Processamento com janela de 32x32 pixels e máscara digital (Nf = 390).



Figura 5.55 – Campo de velocidades da bolha de Taylor com 32x32 pixels (Nf = 390).

A imagem adquirida da pequena bolha de Taylor e, uma mistura de 50% água e 50% glicerina é apresentada na figura 5.56. A figura 5.57 apresenta a máscara digital obtida após a binarização do resultado da subtração entre as imagens filtradas da bolha e apenas do tubo.

Pode-se observar que tanto o processamento com janela de interrogação de 64x64 *pixels* como a de 32x32 *pixels* (figuras 5.58 e 5.59) apresentaram resultados com boa resolução e representam bem o escoamento ao redor da bolha. Pode-se observar nas figuras 5.58 e 5.59 que o escoamento na esteira da bolha encontra-se em regime turbulento (Nf = 3168), apresentando um comportamento assimétrico em torno de r/D = 0.



Figura 5.56 – Imagem da bolha de Taylor obtida com o *PIV*, *LIF* e *PST* ( $Re_B = 1102$ ).



Figura 5.57 – Máscara digital para uma pequena bolha de Taylor ( $Re_B = 1102$ ).



Figura 5.58 – Campo de velocidades da bolha de Taylor com 64x64 *pixels* (Nf = 3168).



Figura 5.59 – Campo de velocidades da bolha de Taylor com 32x32 *pixels* (Nf = 3168).

### 5.4. Velocidade da bolha

Para a determinação da velocidade da bolha de Taylor, foram utilizadas duas fotocélulas posicionadas a uma distância fixa de 31 cm. A figura 5.60 apresenta o registro da bolha ao passar pelo sensor. O detector gera um pulso quando a bolha interrompe a luz do diodo. As fotocélulas fazem a aquisição de dois pontos cada, sendo o (1) e (3) o registro da detecção do nariz da bolha e (2) e (4) o da esteira da bolha.

O cálculo da velocidade é feito dividindo-se a distância pré-determinada pelo intervalo de tempo entre dois registros do nariz da bolha. Como pequenas bolhas acompanham o escoamento na esteira da bolha, o sensor pode adquirir mais de um ponto, portanto não é recomendado utilizar os dados da esteira da bolha para o cálculo da velocidade.



Figura 5.60 – Cálculo da velocidade da bolha.

Multiplicando-se a velocidade calculada anteriormente pelo intervalo de tempo entre (1) e (2) ou (3) e (4) podemos determinar o comprimento da bolha de Taylor. No caso ilustrado na figura 107 o comprimento da bolha é de 3,19 cm.

Uma série de medidas foi realizada para uma concentração em peso de 50% de glicerina e 50% de água destilada. A velocidade média da bolha de Taylor foi de 0,171 m/s. A mesma metodologia foi realizada para uma concentração em peso de 80% de glicerina e 20% de água destilada. A velocidade média da bolha de Taylor foi de 0,169 m/s.

A velocidade calculada pelos sensores fotoelétricos apresentaram um valor 5% menor que o calculado pela técnica de *PIV*.