

5

Descrição da técnica de medição e processamento de imagens

Neste capítulo, são descritos os detalhes da técnica óptica utilizada e as características do processamento de imagens desenvolvidos para a extração de informações quantitativas do escoamento intermitente. Dentre as informações obtidas, destaca-se o estudo do formato da frente e da traseira da bolha alongada, onde verifica-se na literatura uma notável carência de técnicas experimentais capazes de abordar adequadamente este tema.

5.1.

Técnica de sombra (*shadow technique*)

A técnica de sombra é um método de medição óptica, não intrusiva, geralmente utilizado em escoamentos gás-líquido para a identificação de parâmetros como o contorno da interface, tamanho e formato de bolhas, velocidade de cada fase, etc. (Nogueira *et al.*, 2003; Carpintero, 2009; Fonseca Jr, 2009). A técnica consiste basicamente na aplicação de uma iluminação de fundo intensa e uniforme sobre as fases, de modo que a luz que atravessa a tubulação é capturada por uma câmera localizada do lado oposto à iluminação de fundo. Na região da interface, a passagem de luz é atenuada, gerando uma sombra que é capturada pela câmera e resultando numa imagem com distribuições de intensidade de cinza distintas para as diferentes fases. As intensidades de cinzas variam numa escala intermediária que abrange desde o preto (menor intensidade de cinza) ao branco (máxima intensidade de cinza). A *figura 5.1* a seguir, ilustra a distribuição de intensidades de cinza ao longo de uma linha e uma coluna de uma imagem típica obtida através dessa técnica.

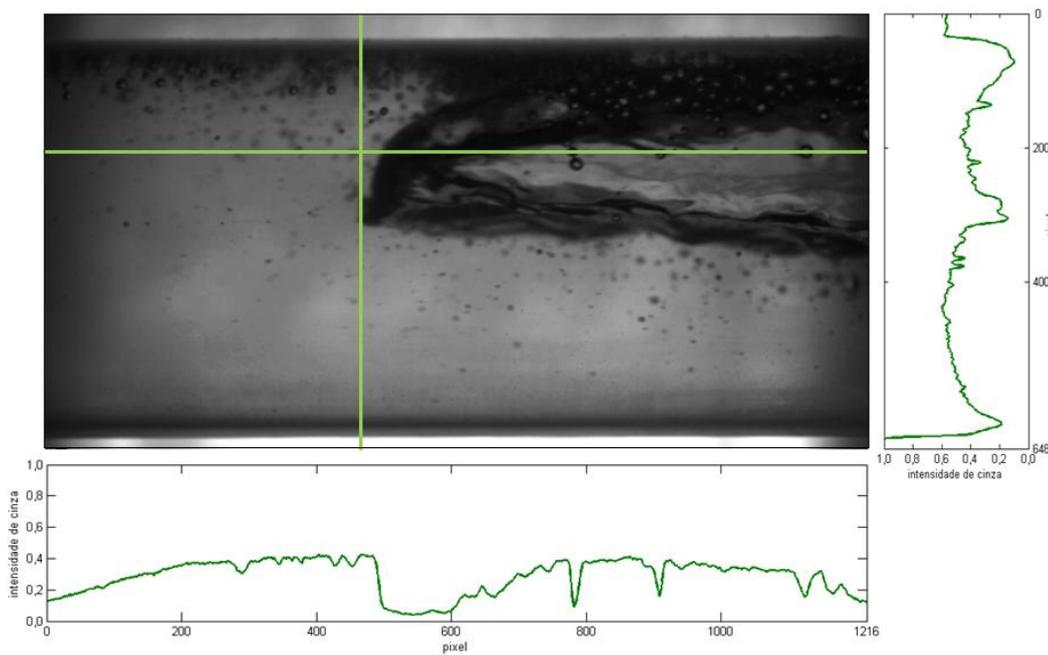


Figura 5.1 - Imagem típica da frente da bolha alongada obtida pela técnica de sombra. Gráficos mostram a distribuição de intensidade de cinza na imagem ao longo de duas linhas ortogonais.

5.2. Configuração experimental da técnica

Para a montagem do aparato experimental, utilizou-se um sistema de interruptores de feixe montados ortogonalmente à tubulação. A jusante dos interruptores de feixe, localizava-se a caixa de visualização octogonal, preenchida com água, cujas faces laterais permitiam uma visualização longitudinal do escoamento. Em frente a uma das faces laterais da caixa de visualização, foi montando um painel composto por uma matriz de *LED's* de luz branca, cuja intensidade era controlada por uma fonte de tensão regulável conectada ao painel. Um valor de corrente em torno de *4,5 Ampères* fornecido por uma fonte de tensão regulável foi capaz de manter simultaneamente uma intensa iluminação de fundo e evitar a ocorrência de possíveis danos aos *LED's* e à câmera. Para espalhar a luz proveniente do painel de *LED's* de forma homogênea pelo escoamento, utilizou-se um papel vegetal fixado à lateral da caixa. A *figura 5.2* ilustra o arranjo desses equipamentos que compõem a estação de medição para a implantação da técnica de sombra.

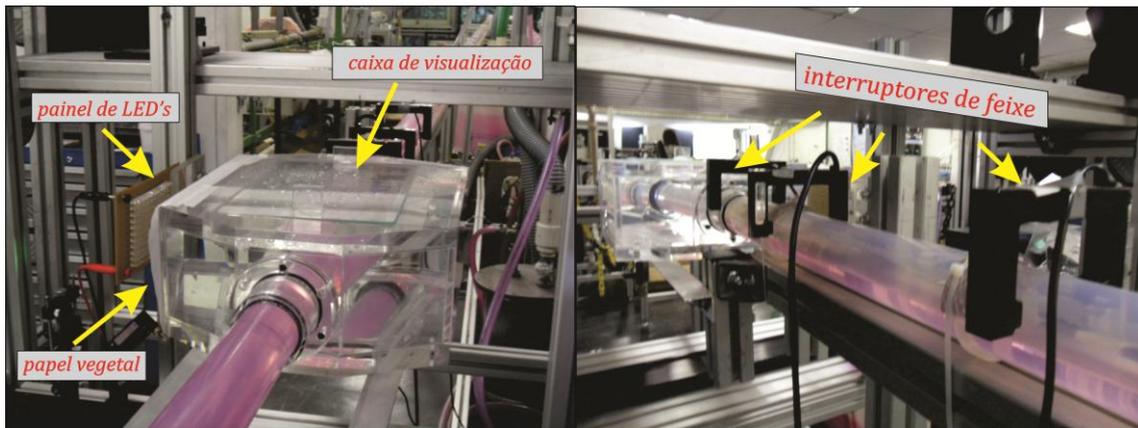


Figura 5.2 - Montagem dos equipamentos que compõem a estação de medição.

Ortogonalmente à caixa de visualização e de frente para a iluminação de fundo fornecida pelo painel de *LED's*, foi montada a câmera de alta taxa de aquisição de quadros, como ilustra a *figura 5.3*. O controle do tempo de exposição e número de imagens adquiridas pela câmera era realizado pelo *software MotionPro X Studio*[®]. Um tempo de exposição em torno de $500 \mu\text{s}$ foi encontrado como o adequado para a obtenção de imagens congeladas do escoamento, com o mínimo de distorções devido ao movimento. Para a ampla maioria dos casos, foram retiradas em torno de 400 imagens para cada configuração de regime de escoamento.

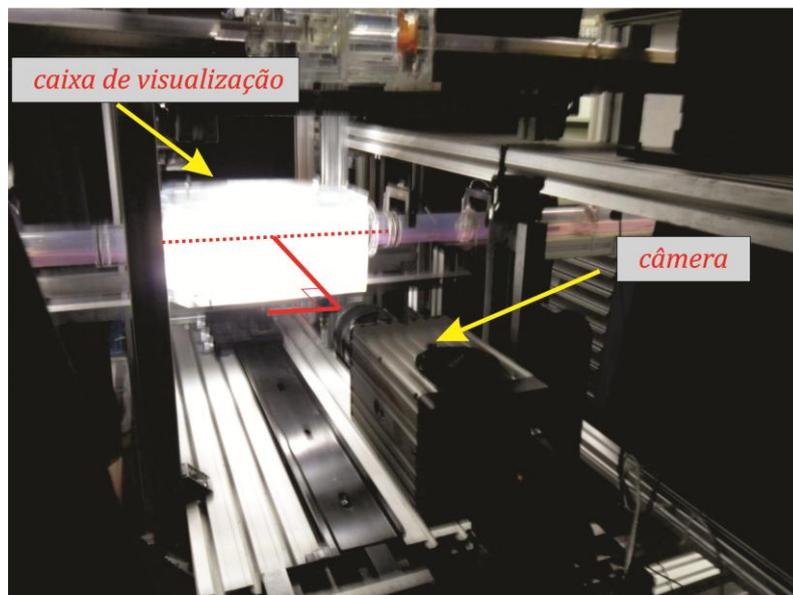


Figura 5.3 - Detalhe da montagem da câmera.

A *figura 5.4* ilustra uma vista tridimensional esquemática de todo o aparato da estação de medição.

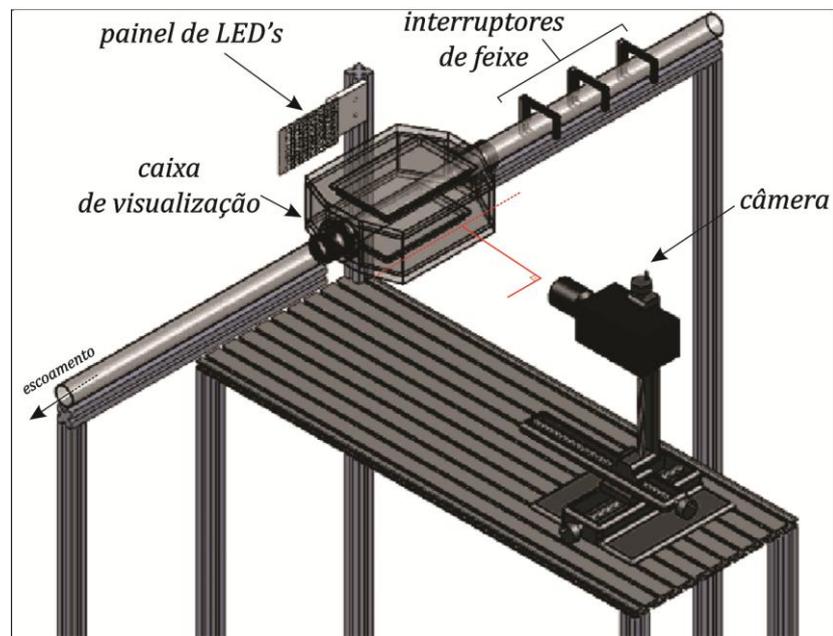


Figura 5.4 - Visão esquemática do aparato experimental da estação de medição

5.3. Processamento de imagens

Para que informações quantitativas pudessem ser extraídas das imagens obtidas através da técnica de sombra, foi desenvolvido um programa em *Matlab*[®] capaz de obter as seguintes informações:

- i. velocidade da frente da bolha;
- ii. formato da frente da bolha;
- iii. velocidade da traseira da bolha;
- iv. formato da traseira da bolha;

Para que informações quantitativas pudessem ser obtidas, foi necessário a calibração das imagens. O procedimento de calibração foi realizado com o auxílio de um alvo de calibração semi-cilíndrico, onde foi usinada uma matriz de ranhuras de espaçamento conhecido. A *figura 5.5* mostra uma fotografia do alvo de calibração. Introduzindo-se o alvo de calibração na tubulação completamente preenchida com água, ajustou-se o foco da câmera no plano do alvo de calibração e analisando-se a imagem com o auxílio do *software ImageJ*[®] foi possível determinar a correspondência entre as dimensões reais e os *pixels* da imagem. Um fator de calibração de *11 pixels/mm* foi encontrado. Uma explicação minuciosa sobre todas as etapas do procedimento de calibração pode ser encontrada na dissertação de *Farias (2009)*.

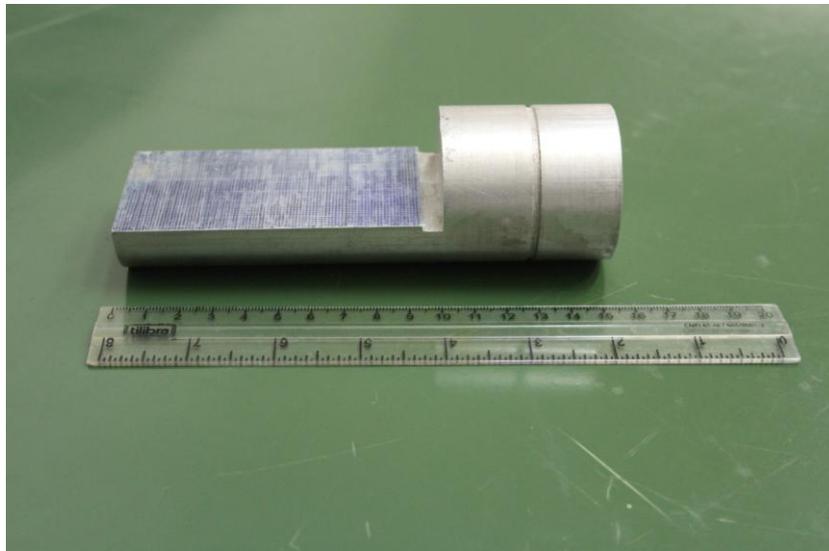


Figura 5.5 - Detalhe do alvo de calibração semi-cilíndrico.

Os detalhes envolvidos para o processamento das imagens da frente e da traseira da bolha alongada possuem características distintas e por essa razão são descritos a seguir de forma separada.

5.3.1

Processamento de imagens da frente da bolha alongada

Um programa desenvolvido em *LabView*[®] foi utilizado para sincronizar os interruptores de feixe, o gerador de pulso e a câmera, possibilitando a captura de um par de imagens consecutivas da frente da bolha alongada. O intervalo de tempo entre o par

de imagens foi de 20 ms para as menores velocidades superficiais e $10\text{-}15\text{ ms}$ para as mais elevadas, configuradas no gerador de pulso conectado à câmera.

Um conjunto de rotinas foi desenvolvido em *Matlab*[®] para o processamento automático das imagens obtidas da frente da bolha alongada, com a finalidade de identificar o contorno da interface. No entanto, com o incremento da velocidade superficial de gás, aumentava substancialmente a quantidade de bolhas dispersas por toda a região da frente, tornando os procedimentos da rotina cada vez mais complexos e ineficazes na delimitação do contorno da interface. O aumento da presença dessas bolhas dispersas é a principal responsável pela limitação das técnicas ópticas e de processamento de imagens, sendo sua complexidade citada na literatura (*Hout et al., 2002; Nogueira et al., 2003; Carpintero, 2009; Fonseca Jr, 2009*). A figura 5.6 ilustra duas imagens típicas de dois regimes distintos com velocidade superficial de líquido de $j_L = 0,2\text{ m/s}$ e velocidade superficial de gás de $j_G = 0,7\text{ m/s}$ (figura 5.6 - a) e $j_G = 1,9\text{ m/s}$ (figura 5.6 - b). A diferença da complexidade do escoamento é evidente.

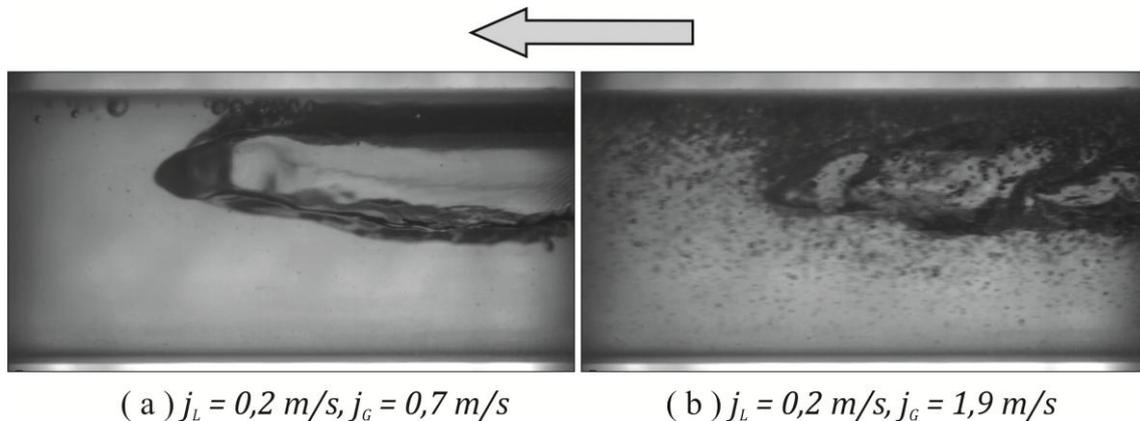


Figura 5.6 – Imagens típicas da frente da bolha para dois regimes distintos com $j_L = 0,2\text{ m/s}$ e (a) $j_G = 0,7\text{ m/s}$, (b) $j_G = 1,9\text{ m/s}$.

Esse aumento na quantidade de bolhas dispersas ao longo do escoamento inviabilizou a utilização do procedimento automático, sobretudo na identificação da região que delimita o início da frente da bolha. Uma alternativa encontrada foi desenvolver uma rotina onde um usuário identificava visualmente esta região, clicando e informando à rotina o provável ponto onde a bolha tinha o seu início. Identificadas duas dessas regiões em imagens consecutivas, a rotina determinava a distancia entre estas duas regiões e como o intervalo de tempo era conhecido, calculava-se a velocidade da frente da bolha (ver figura 5.7).

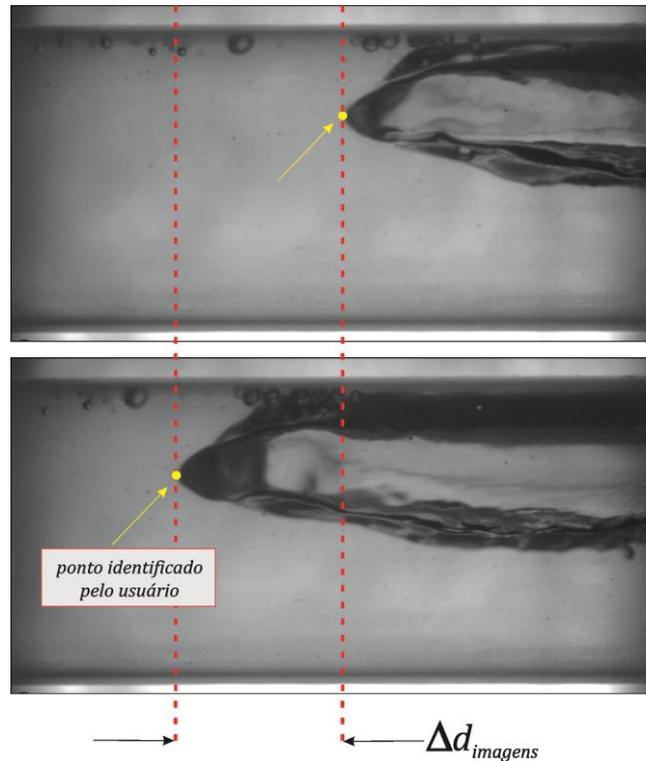


Figura 5.7 - Identificação pelo usuário da região que delimita o início da frente da bolha em duas imagens consecutivas.

A seguinte equação foi utilizada para o cálculo da velocidade u_B da frente da bolha

$$u_B = \frac{1}{c'} \frac{\Delta d_{imagens}}{\Delta t} \quad (5.1)$$

onde c' denota o fator de calibração, em unidades de *pixels/mm* ($c' = 11 \text{ pixels/mm}$), $\Delta d_{imagens}$ é distância identificada pelo usuário em duas imagens consecutivas, em unidades de *pixels*, e Δt é o intervalo de tempo em milésimos de segundo. Com isso, obteve-se u_B no sistema internacional de unidades.

Após o cálculo da velocidade de cada par de imagens, retirava-se a média de todas as velocidades calculadas em cada regime, obtendo-se então uma velocidade média representativa do regime em específico. Foi estimada uma incerteza

experimental em torno de 5 % para a velocidade média obtida através dessa metodologia. Os cálculos encontram-se no *Apêndice*.

Obviamente, houve imagens onde a identificação visual da região de início da bolha era duvidosa. Nestes casos, as imagens eram desconsideradas para quaisquer finalidades.

Para a determinação do formato da frente da bolha, somente a segunda imagem utilizada no procedimento de cálculo da velocidade era considerada, pois esta ocupava maior proporção do quadro da região de visualização do que a primeira. Identificada visualmente pelo usuário a região de início da frente da bolha na segunda imagem, esta era então recortada horizontalmente num comprimento equivalente a *um* diâmetro, acrescido de um espaçamento ε de 20 *pixels* ($\varepsilon \approx 0,04D$) à esquerda do ponto identificado. A finalidade deste pequeno espaçamento era preservar o contorno da frente da bolha, dando ao usuário uma tolerância na identificação do ponto que delimitava o início da frente e evitando que o contorno da frente da bolha fosse recortado. O recorte num quadrado com lado de comprimento de $1D$ delimita a região denominada de nariz da bolha, sendo este comprimento geralmente aceito (*Fagundes Netto et al., 1999*).

Na imagem recortada, realizou-se a subtração do fundo, seguido de uma normalização da intensidade de cinza, com a finalidade de ressaltar o contorno da bolha e melhorar a iluminação. A figura a seguir ilustra esses procedimentos.

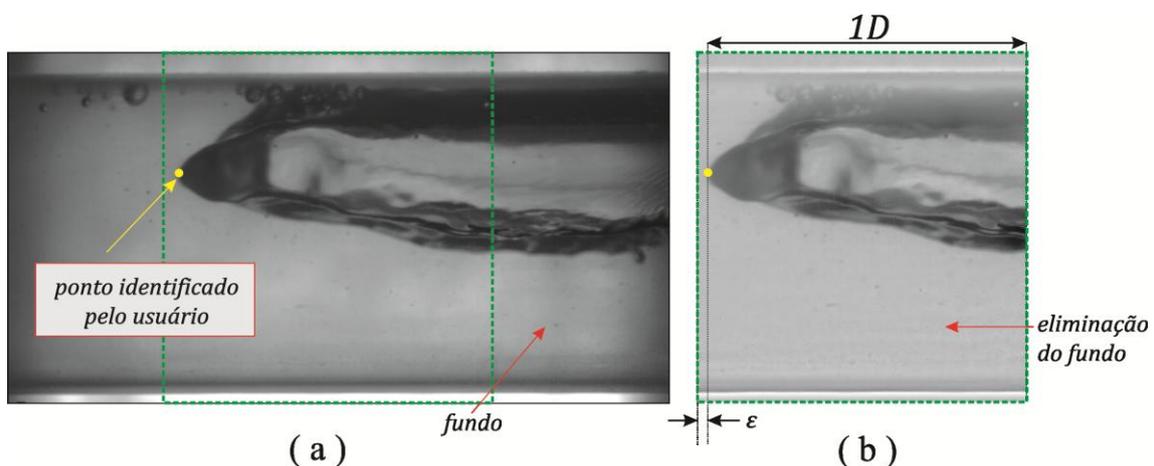


Figura 5.8 – Procedimento de recorte: (a) imagem original e (b) imagem recortada e normalizada.

A extração do fundo foi realizada subtraindo a intensidade de cinza da imagem da bolha pela imagem de um fundo estimado. Este fundo estimado foi obtido pela média de cerca de 30 imagens da região do pistão de líquido, adquiridas sob as mesmas condições de vazão de líquido e gás que as imagens da frente da bolha (ver *figura 5.9*).

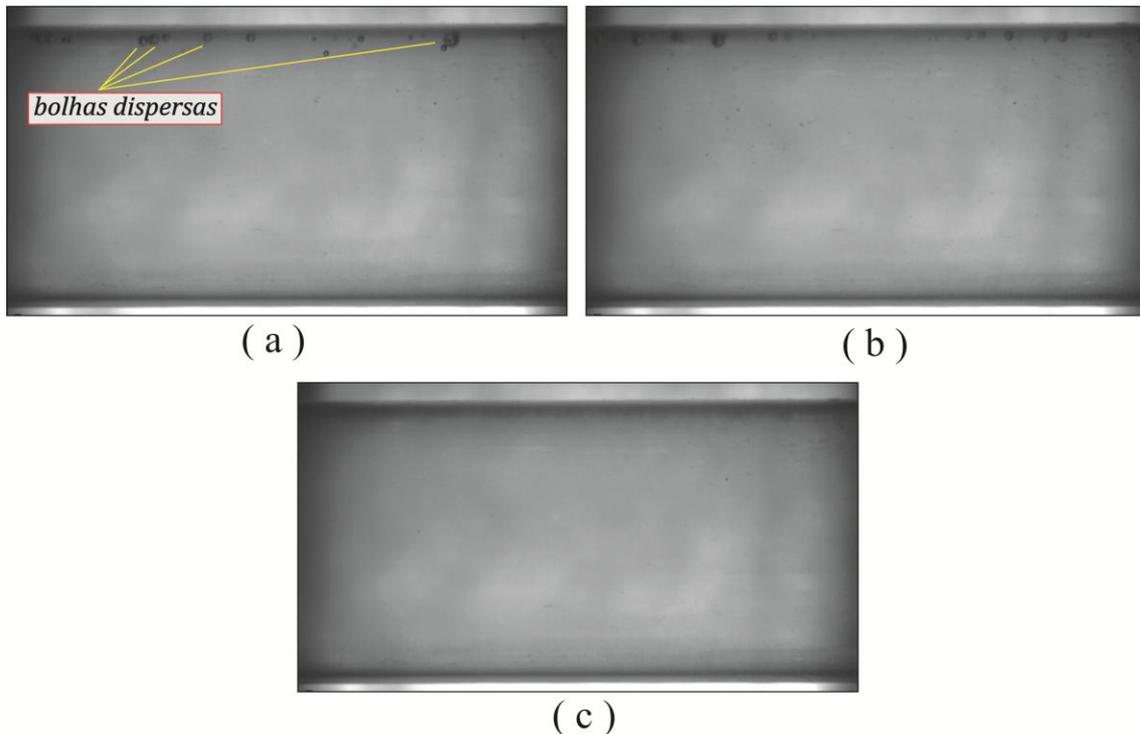


Figura 5.9 - Imagens da região de pistão de líquido: (a) primeiro pistão de líquido, (b) segundo pistão de líquido e (c) imagem média de 30 pistões de líquido.

Realizado este procedimento de recorte, subtração de fundo e normalização de cada imagem da frente da bolha, calculou-se a média de todas as imagens obtidas para um determinado regime. Esta *imagem média* da frente de bolha continha o espalhamento característico da intensidade do regime. A imagem média mostrada na figura 5.10 - a, foi resultado da média de 326 imagens. Retirou-se da imagem média a região não pertencente ao escoamento no interior do tubo e normalizou-se a intensidade de cinza. A figura 5.10 - b ilustra a imagem média normalizada da frente da bolha somente na região no interior do tubo.

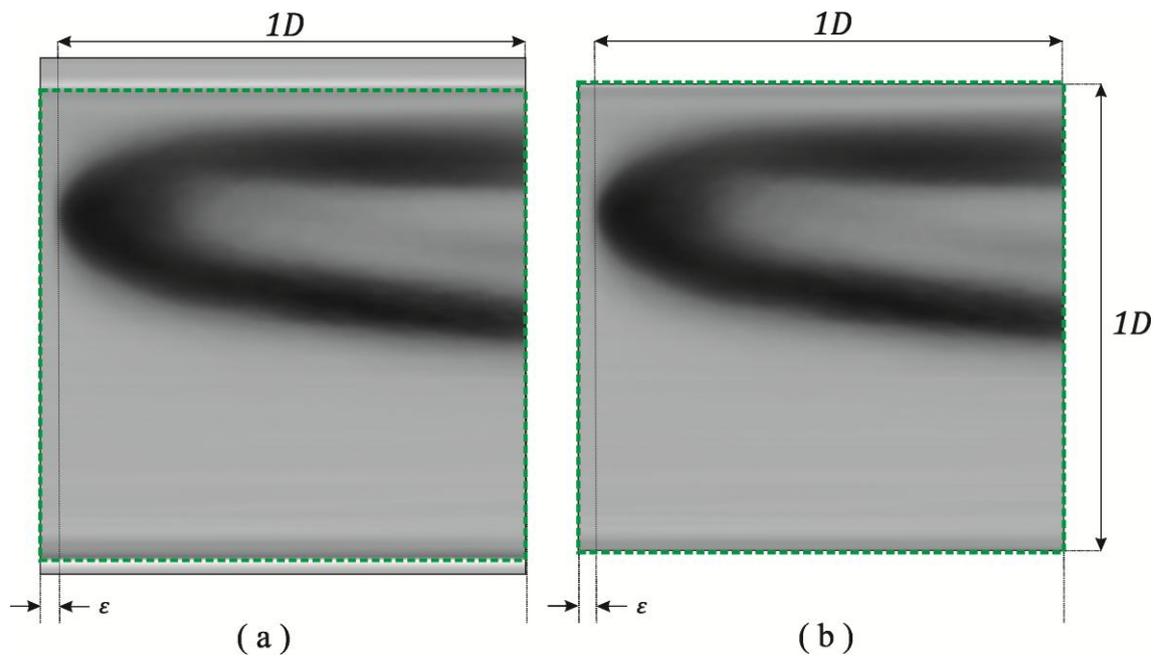


Figura 5.10 - (a) Imagem média e (b) recorte da imagem média de 326 imagens com remoção da região da parede do tubo.

Através desta imagem média da frente da bolha no interior do tubo, realizou-se o procedimento de segmentação, com o objetivo de determinar o contorno que delimita a região da interface. A segmentação da imagem consiste na binarização através de um limiar (*threshold*): *pixels* com intensidade de cinza acima deste limiar foram considerados brancos (valor lógico 1) e abaixo deste limiar, foram considerados pretos (valor lógico 0). Este limiar foi determinado encontrando-se o valor mínimo da intensidade de cinza na coluna ϵ da imagem. A detecção da interface, em cada coluna, foi obtida contando-se todos os *pixels* brancos das linhas da imagem binarizada até encontrar o primeiro *pixel* preto. Terminada a contagem, esse valor era considerado como sendo a interface. O processo de procura da interface era realizado primeiramente na parte superior, percorrendo as linhas de cima para baixo e posteriormente na parte inferior de baixo para cima, em todas as colunas à partir da coluna ϵ . Após essa etapa, as duas interfaces eram conectadas. A *figura 5.11 - a* ilustra a imagem binarizada com o interior da bolha removido, enquanto a *figura 5.11 - b*, ilustra a imagem média com o contorno que delimita a interface sobreposto.

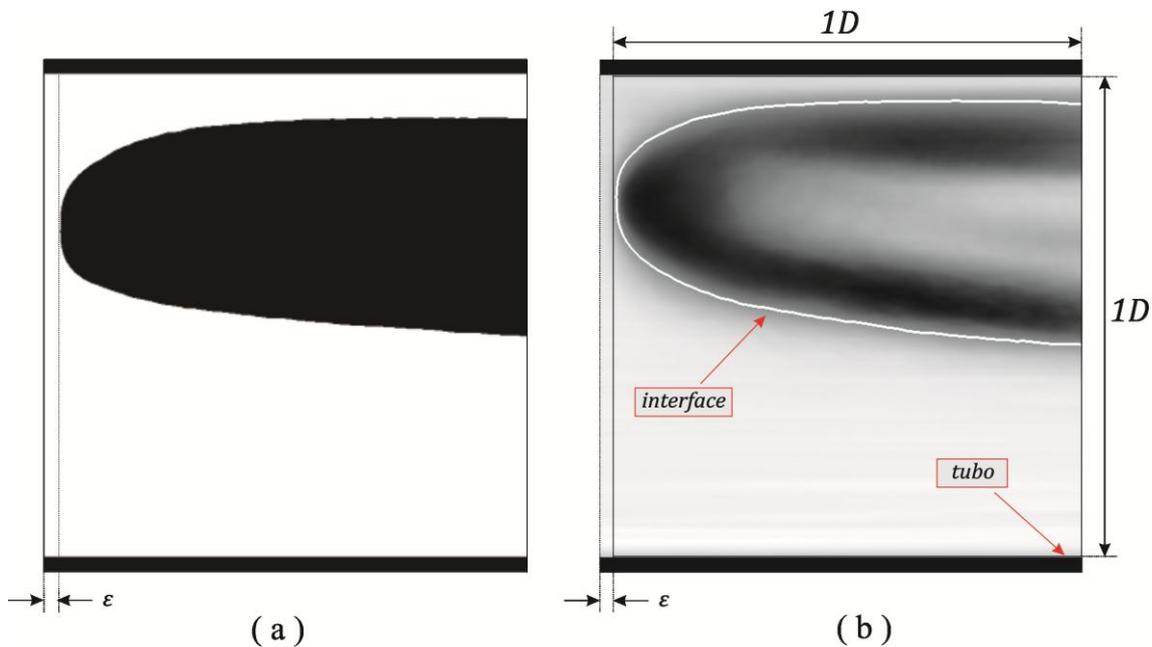


Figura 5.11 - (a) Imagem binarizada e (b) imagem média com a interface delimitada.

Em alguns regimes, com velocidades superficiais de gás elevadas, a imagem média não apresentava uma região de contorno bem definido devido à grande presença de bolhas dispersas inerentes a estes regimes. Este fato inviabilizou uma identificação da interface com base somente na metodologia discutida, sobretudo para a parte superior da bolha, onde a presença de bolhas dispersas era ainda maior e o contorno encontrado apresentava-se geralmente descontínuo. Como alternativa, adotou-se nestes casos um limiar local para a geração da imagem binária até que o contorno da interface fechasse.

Uma observação amplamente discutida na literatura é a mudança na altura do nariz da bolha com o aumento das vazões das fases (*Bendiksen, 1984; Woods e Hanratty, 1996*). No processamento de imagens, a altura do nariz foi determinada pela média da altura da interface superior e inferior na coluna ϵ . Esta altura não é capturada por técnicas tradicionalmente utilizadas em escoamentos bifásicos (*Fagundes Netto et al., 1999*), sendo sua medida uma notável carência da literatura. Neste contexto, reside uma das principais contribuições da técnica de sombra e de processamento de imagens discutidas e desenvolvidas ao longo deste trabalho.

5.3.2

Processamento de imagens da traseira da bolha alongada

Para o processamento das imagens da traseira da bolha alongada, foram adquiridas quatro imagens consecutivas, com intervalos de tempo entre as imagens variando entre 20 ms e 10 ms . A aquisição de uma maior quantidade de imagens da traseira da bolha do que da frente, foi necessária porque o enquadramento da região do salto hidráulico era mais complicado que o enquadramento do nariz da bolha. *Fagundes Netto et al. (1999)* definiram a região do salto hidráulico como a região conexa entre a frente do pistão de líquido e o final da traseira da bolha, caracterizada pelo aparecimento de uma espessura de filme de líquido praticamente constante, seguida de um salto que a depender das vazões das fases poderia apresentar ou *não* um formato semelhante a uma escada (*staircase shape*). Analogamente à rotina desenvolvida para a identificação da localização do início da frente da bolha, foi utilizado um procedimento visual para a identificação do início do salto hidráulico. A figura a seguir ilustra essa identificação visual para dois regimes distintos.

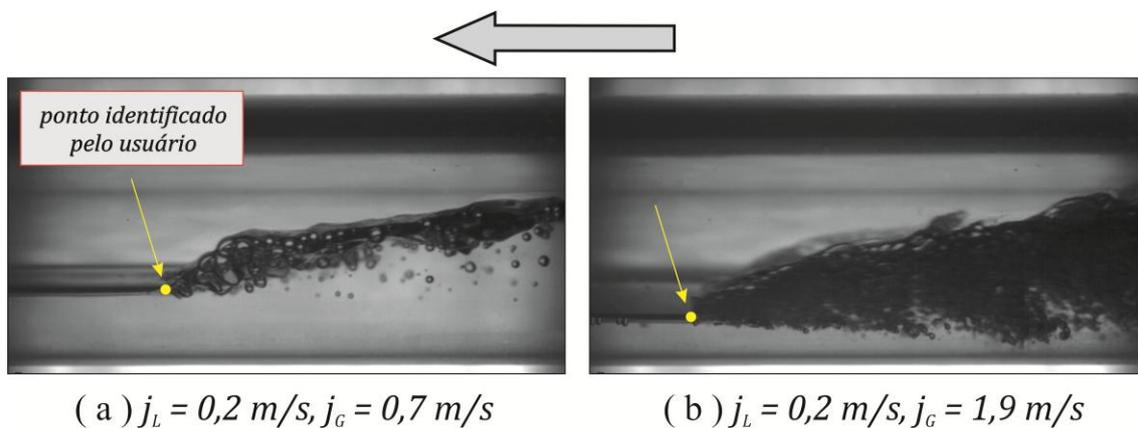


Figura 5.12 – Imagens típicas do salto hidráulico para dois regimes distintos da com $j_L = 0,2\text{ m/s}$ e (a) $j_G = 0,7\text{ m/s}$, (b) $j_G = 1,9\text{ m/s}$.

Das *quatro* imagens obtidas do salto hidráulico, somente duas consecutivas que apresentassem o melhor enquadramento eram aproveitadas para o cálculo da velocidade. Esta velocidade era calculada da mesma maneira que o procedimento da frente da bolha, descrito na seção anterior. O ponto identificado pelo usuário também forneceu informações sobre a espessura de filme junto ao salto hidráulico.

A análise do formato do salto hidráulico, somente utilizou a segunda imagem do cálculo da velocidade, devido ao melhor enquadramento. A seguir, esta imagem era recortada horizontalmente num comprimento total equivalente a $1,4$ diâmetros. Fagundes Netto et al. (1999) encontraram saltos hidráulicos com comprimento entre $0,7D$ e $1,3D$, fato que justifica esta escolha. A figura 5.13 ilustra uma imagem utilizada para a análise do formato do salto hidráulico com a respectiva imagem recortada. Como referência para o recorte, tomou-se uma distância ε de 80 pixels ($\varepsilon \approx 0,14D$) a partir de onde o usuário identificava o início da inclinação do salto hidráulico. O ponto identificado pelo usuário fornecia a espessura de filme de líquido na imagem. (ver figura 5.13).

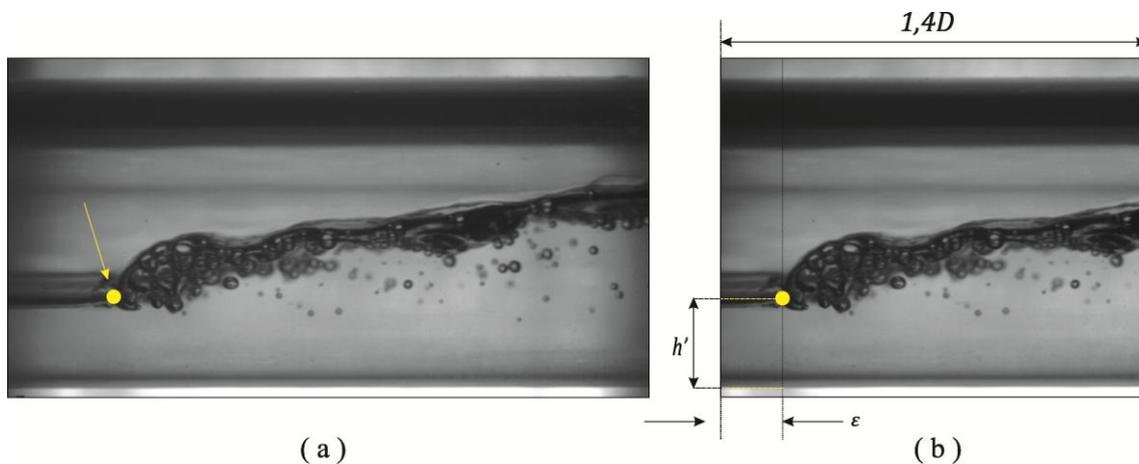


Figura 5.13 - (a) Imagem típica do salto hidráulico ($j_L = 0,2$ m/s, $j_G = 0,7$ m/s) e (b) imagem recortada.

Uma *imagem média* do salto hidráulico foi obtida através da média de todas as imagens recortadas da traseira da bolha para um determinado regime, analogamente ao procedimento adotado no tratamento das imagens da frente da bolha. Para a estimativa da inclinação do salto hidráulico, uma região específica da imagem foi selecionada por conter uma iluminação mais adequada e menores efeitos ópticos indesejados devido a curvatura do tubo e a reflexão da luz. Posteriormente, a imagem recortada contendo esta região foi normalizada e binarizada. O procedimento de segmentação foi realizado utilizando-se como limiar de corte o máximo valor das mínimas intensidades de cinza de cada coluna da imagem. Esta segmentação gerou uma região com um espalhamento de vários *pixels* pretos. A estimativa da reta que melhor reproduzia o formato do salto hidráulico foi obtida através de uma regressão linear do contorno superior deste espalhamento de *pixels* pretos. Ao final, o coeficiente angular

da reta ajustada era considerado como sendo a inclinação do salto hidráulico. O formato do salto foi composto por um patamar dado pela média das espessuras de filme identificadas pelo usuário e conectado a uma reta com o mesmo coeficiente angular obtido pelo ajuste linear. A *figura 5.14*, ilustra esquematicamente todas as etapas do processamento das imagens para a determinação do formato da traseira da bolha.

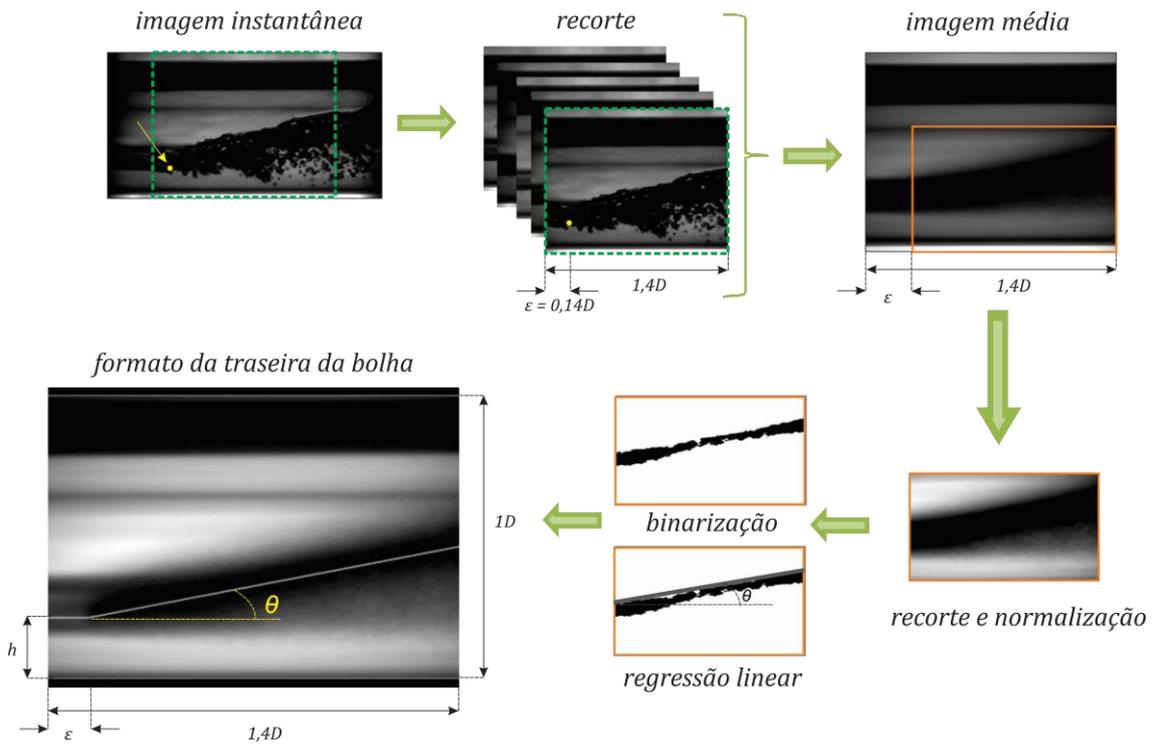


Figura 5.14 - Esquema do processamento de imagens utilizados para a determinação do formato do salto hidráulico.