

5 Experimentos para Medição Longitudinal do Filme de Líquido

Os experimentos realizados no presente estudo tiveram como enfoque principal o desenvolvimento e validação de técnicas ópticas de medição do comportamento dinâmico do filme de líquido presente no escoamento anular bifásico horizontal. Dois modos de visualização foram testados, produzindo diferentes visões do filme de líquido e produzindo informações quantitativas sobre o comportamento dinâmico do mesmo. Os dois modos de visualização implementados – longitudinal e transversal – já foram apresentados de maneira breve no Capítulo 3.

Em ambos os casos, a técnica de Fluorescência Planar Induzida por Laser – *PLIF* – foi empregada para permitir a separação óptica da luz emitida pelo filme daquela espalhada na interface ar-água. Um tubo fabricado de *FEP* foi utilizado para resolver o problema do ajuste do índice de refração, permitindo uma boa visualização do filme perto da parede da tubulação.

A partir das imagens capturadas, procedimentos de processamento digital de imagens foram utilizados para quantificar a região do filme de líquido em cada imagem, produzindo as informações quantitativas desejadas.

Neste capítulo serão descritos os procedimentos utilizados para a condução dos experimentos baseados na técnica de visualização longitudinal e o processamento digital de imagens elaborado para a extração quantitativa do comportamento temporal do filme líquido. Os procedimentos adotados para a captura e processamento de imagens transversais serão descritos no Capítulo 6.

5.1. Aquisição das Imagens Longitudinais

Essa seção dedica-se à apresentação dos procedimentos utilizados para a realização da visualização longitudinal do escoamento. Aspectos relacionados ao alinhamento óptico, acionamento dos equipamentos, calibração e resolução das imagens e realização do experimento serão apresentados.

5.1.1.

Preparação da Seção de Testes e Acionamento dos Equipamentos

Antes da instalação dos equipamentos de visualização e iluminação, a seção de testes formada pelo tubo de *FEP* era alinhada e nivelada, para garantir um escoamento horizontal. Em seguida, os componentes ópticos eram montados e alinhados. A Figura 5.1 apresenta uma vista da montagem dos componentes ópticos preparados para a visualização longitudinal do filme de líquido inferior no interior do tubo. O feixe plano de laser pode ser visto incidindo na caixa de visualização por baixo, após ser desviado pelo espelho posicionado à 45°, cruzando o tubo de *FEP* em um plano meridional e saindo pela parte superior da caixa de visualização. A câmera montada ortogonalmente ao plano de luz está focalizada no plano de iluminação.

Os alinhamentos da câmera, laser, lentes e principalmente do espelho óptico eram verificados antes de cada série de medições. As lentes cilíndricas e esféricas para cada configuração óptica foram escolhidas após diferentes testes. A configuração considerada ideal fornecia um plano de laser com espessura de aproximadamente 0,5 mm no filme de líquido, iluminando toda a região de interesse.

A câmera era então acionada juntamente com seu programa de controle *IDT Motion Pro X3*®. O banho de refrigeração do laser era então ligado e aguardava-se até que a temperatura recomendada de operação de 27°C fosse atingida. Em seguida, o sincronizador de sinais e o laser eram acionados pelo programa *Insight 3G*®. Este programa era responsável também pelas configurações da frequência de pulsos do laser, da frequência de captura das imagens e do ajuste do tempo de exposição do sensor da câmera.

Nos experimentos foi utilizado um laser pulsado de dupla cavidade. Para aumentar a intensidade da luz em cada quadro da imagem, optou-se por disparar as duas cavidades do laser simultaneamente.

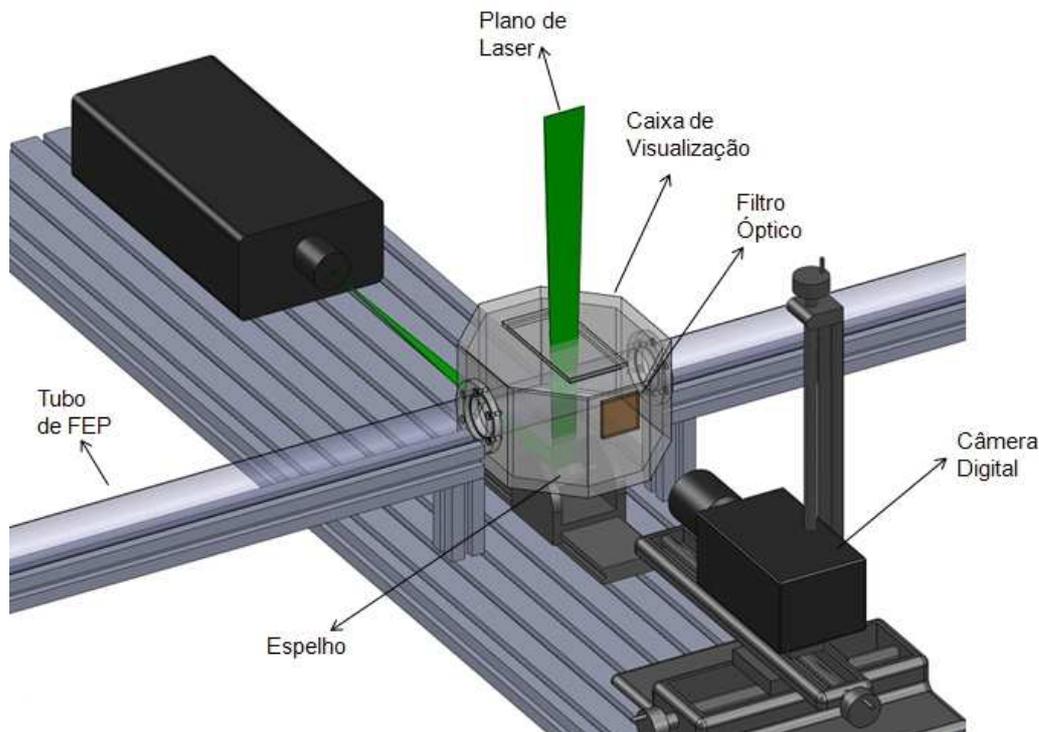


Figura 5.1 - Configuração utilizada para a captura de imagens longitudinais do filme de líquido na parte inferior do tubo.

5.1.2. Calibração das Imagens

Para a determinação da espessura do filme de líquido a partir das imagens capturadas é necessário realizar um procedimento de calibração que determina a correspondência entre as dimensões reais no plano do escoamento e as dimensões em *pixels* na imagem. Este procedimento de calibração foi realizado utilizando um alvo inserido dentro do tubo de testes, pela saída da seção, após a remoção da mangueira de retorno.

Para a seção de menor diâmetro, o alvo foi montado a partir de um cilindro de latão com 1 m de comprimento. Na extremidade do cilindro, foi usinada uma meia-cana com 50 mm de comprimento, formando uma seção plana, que era montada de modo a ficar alinhada com o plano vertical de iluminação do laser e, conseqüentemente, ortogonal à câmera. Nesta seção plana foi usinada uma malha padrão constituída de linhas verticais e horizontais espaçadas regularmente de 1 milímetro. A outra extremidade do alvo possuía um sistema de encaixe com O-rings que selava a água dentro do tubo de FEP. Esta conexão foi usinada em polipropileno e possuía um respiro que permitia que o ar existente na tubulação fosse eliminado, deixando o tubo completamente

cheio da solução de água e rodamina envolvendo o alvo de calibração. A Figura 5.2 ilustra as partes do alvo de calibração introduzido na seção de testes.

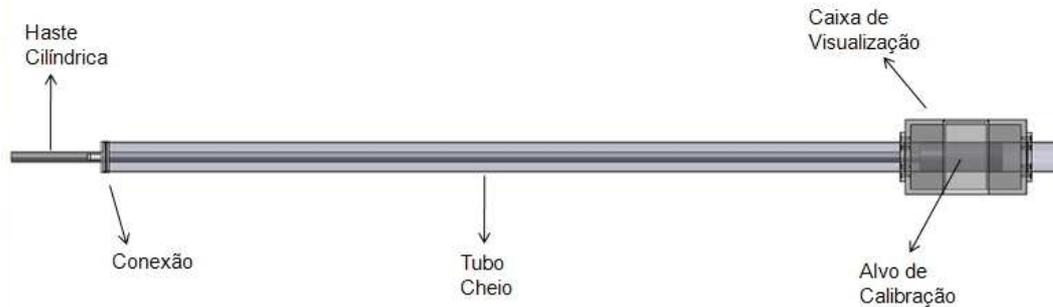


Figura 5.2 - Alvo de calibração introduzido na seção de testes.

Para a seção de maior diâmetro, um sistema de calibração foi projetado com concepção igual ao da seção de menor diâmetro. O alvo foi montado a partir de um cilindro de 2 m de comprimento, permitindo a colocação da malha de calibração na região de visualização. Analogamente ao alvo descrito anteriormente, este possuía em sua extremidade uma grade padrão usinada com o mesmo espaçamento, porém com o dobro do comprimento.

Após o posicionamento do alvo, a seção de teste era preenchida com a solução de água e rodamina usadas nos experimentos e o ar removido pelo respiro disponível na conexão posicionada na extremidade do calibrador. O laser era acionado em baixa intensidade e o plano do alvo do calibrador era alinhado de modo que o plano do laser apenas tocasse a face do alvo de calibração. Nesta posição garantia-se que o plano de luz estava penetrando no tubo através de um plano diametral vertical. A Figura 5.3 ilustra o alvo de calibração introduzido na seção de testes alinhado com o plano de laser.

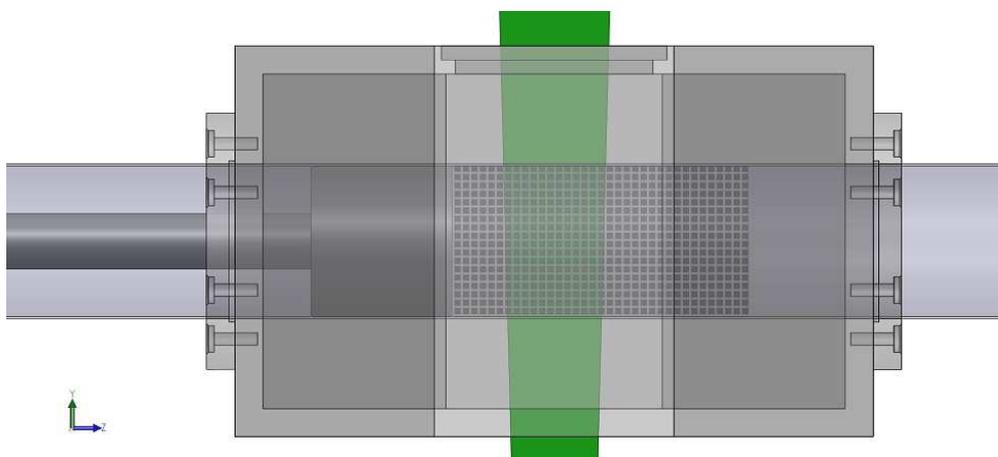


Figura 5.3 - Detalhe do alvo de calibração posicionado dentro na seção de testes e alinhado com o plano de laser.

Uma vez alinhado o alvo com o plano do laser, o laser era desligado e um foco de luz branca externa era ligado para iluminar o alvo de calibração. A câmera era então focalizada no alvo de calibração. O ajuste do foco era realizado diretamente no anel de focalização da lente ou movimentando-se a mesa de coordenadas que sustentava a câmera, alterando a distância entre a câmera e o alvo. A imagem focada era então capturada. A Figura 5.4 apresenta uma imagem típica do alvo capturada no procedimento de calibração.

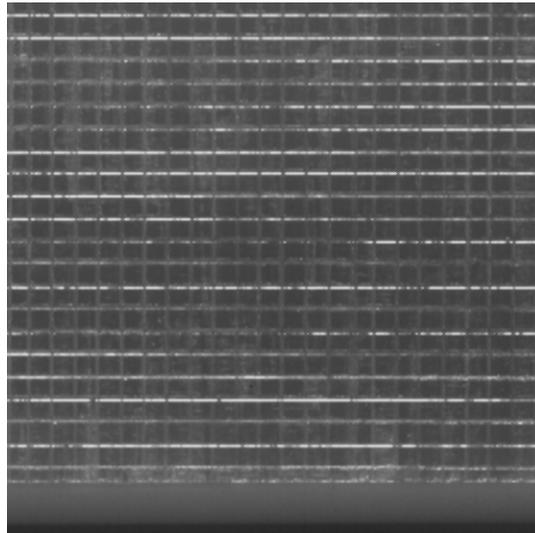


Figura 5.4 - Imagem do alvo de calibração posicionado dentro da seção de testes capturado pela câmera.

A calibração *pixel/mm* era determinada com o auxílio de um programa de edição de imagens, o ImageJ[®]. A imagem do alvo de calibração era apresentada pelo programa e uma função de medição de distâncias era utilizada para determinar a distância, em *pixels*, entre dois pontos de interseção de linhas da malha de calibração. A razão entre a medida em *pixels* e a distância conhecida do alvo fornecia a calibração desejada. Neste procedimento, o fator de calibração era, na verdade, obtido pela média de diversas operações de calibrações realizadas consecutivamente. Além disto, para minimizar a incerteza da calibração, eram escolhidas distâncias entre os pontos de no mínimo 7 mm para a medição em *pixels*. Deve-se mencionar que as medições realizadas nas regiões da imagem perto das paredes e no centro, tanto no sentido vertical quanto horizontal, apresentaram a mesma calibração, indicando que não havia distorções ópticas significativas. Depois de terminado o procedimento de calibração, o alvo era retirado e nenhuma alteração no sistema óptico era realizada. Os experimentos de medição eram conduzidos sob as mesmas

condições de calibração, ou seja, mesma distância da lente ao plano iluminado e mesmo ajuste de foco.

De posse do fator de calibração da imagem para a lente utilizada e para uma determinada distância entre a lente e o plano iluminado escolhida, era realizada uma estimativa das incertezas nas medições quantitativas a serem realizadas, como espessura de filme e velocidade de onda. A incerteza nestas grandezas é diretamente influenciada pela resolução espacial da imagem. Caso a calibração não produzisse um valor de incerteza aceitável, a ampliação da imagem era alterada, modificando a lente objetiva, aproximando ou afastando a câmera, ou inserindo anéis de extensão. Em seguida, um novo procedimento de calibração era realizado. O Apêndice B descreve detalhadamente o procedimento adotado para a estimativa dos níveis de incertezas experimentais associadas ao processo de calibração espacial utilizado.

5.1.3. Captura das Imagens

O experimento propriamente dito era iniciado pelo ajuste das vazões de ar e água da configuração a ser ensaiada. O ajuste da vazão era realizado controlando-se os inversores de frequência da bomba e do compressor até que o par de vazões indicadas pelos medidores de vazão atingissem os valores desejados. Através da leitura do termômetro e manômetro localizados na entrada do rotâmetro de ar, a correção da vazão com a densidade nas condições de operação era feita conforme descrito no Apêndice A.

Com os parâmetros de vazão de água e ar ajustados conforme desejados, as imagens da parte inferior do filme líquido eram capturadas em tempo real pela câmera posicionada ortogonalmente ao plano de luz.

Uma série de experimentos foi realizada para validar a técnica desenvolvida. As vazões foram escolhidas de modo a que todos os casos testados estivessem dentro do regime anular de escoamento. A matriz de testes investigada é apresentada no Capítulo 8, onde os resultados obtidos são analisados.

A câmera, controlada pelo *software IDT Motion Pro X3[®]*, gravava as imagens longitudinais do escoamento. Todas as imagens eram armazenadas na memória interna câmera, limitada em 8 Giga *bytes*, e descarregadas para o computador no fim de cada experimento. Devido a esta limitação, a escolha da frequência de aquisição e tamanho das imagens era muito importante,

interferindo na resolução dos dados medidos. No caso da medição da espessura média do filme de líquido, valor *RMS* da espessura de filme ou determinação do espectro de frequência das ondas, é importante, para se obter um nível de incerteza satisfatório, que um longo registro temporal da espessura de filme esteja disponível. Quanto mais longo for o registro, menor a incerteza nessas grandezas. Assim, para estes ensaios, optou-se por operar a câmera e o laser sincronizados em uma frequência de 250 Hz. A resolução espacial considerada adequada para caracterizar a espessura do filme de líquido foi de 512x512 *pixels*. Esta combinação de valores de frequência de aquisição de imagens e resolução espacial permitia a gravação de cerca de 52 segundos de escoamento o que produziu níveis de incertezas experimentais considerados satisfatórios.

Para a medida da velocidade de propagação das ondas, foi utilizado o método de correlação cruzada dos sinais de variação temporal da espessura do filme de líquido medidos em duas posições axiais próximas no tubo, que será descrito em detalhes no Capítulo 7. Neste caso, a utilização de baixas frequências de aquisição de imagens impede a captura dos padrões de onda dentro do campo de visão da câmera. Assim, torna-se necessária a utilização de altas taxas de aquisição de imagens, o que limita o tempo máximo de captura. Na medição da velocidade de propagação de ondas foi utilizada uma frequência de aquisição de 3000 Hz e uma resolução espacial de 512x512 *pixels*, para a seção de menor diâmetro, e 512x1280 *pixels*, para a outra. Esta configuração resultou em apenas 4,5 segundos de tempo de gravação do escoamento.

5.1.4. Resolução Espacial das Imagens

Neste estudo foram utilizadas diferentes configurações de ampliação da imagem, uma estratégia de fundamental importância para garantir níveis de incerteza na medição dentro de limites aceitáveis. O cálculo das incertezas embutidas nas grandezas medidas para cada resolução será explicado detalhadamente no Apêndice B.

Para os experimentos de medida de espessura de filme na seção de 15,8 mm de diâmetro, a montagem óptica utilizou uma melhor resolução espacial, ou seja, uma maior ampliação, resultando em um número maior de *pixels* por milímetro na calibração. A resolução espacial gerada por essa configuração foi de 50,2 *pixel/mm*. A metodologia de cálculo da espessura do filme será descrita na Seção 5.2.4.

A calibração com uma menor ampliação foi utilizada para o cálculo da velocidade através do sinal de espessura de filme. Esta ampliação permitia que em vários quadros seguidos, a mesma onda ainda estivesse percorrendo o campo de visão da câmera. A resolução espacial utilizada para esta configuração foi de 18,2 *pixel*/mm. A metodologia de cálculo da velocidade de propagação das ondas do filme de líquido será descrito no Capítulo 7.

A Figura 5.5 ilustra um esquema da seção de testes de 15,8 mm de diâmetro para a melhor compreensão da região visualizada pela câmera, configurações ópticas e resoluções espaciais resultantes em cada caso estudado para obtenção das imagens longitudinais. Na figura, a menor janela corresponde à maior resolução obtida e utilizada na determinação dos valores médio e *RMS* da espessura do filme de líquido, assim como na determinação de espectro de frequências do sinal de espessura de filme. A maior janela de observação foi utilizada na medição da velocidade de propagação das ondas do filme de líquido.

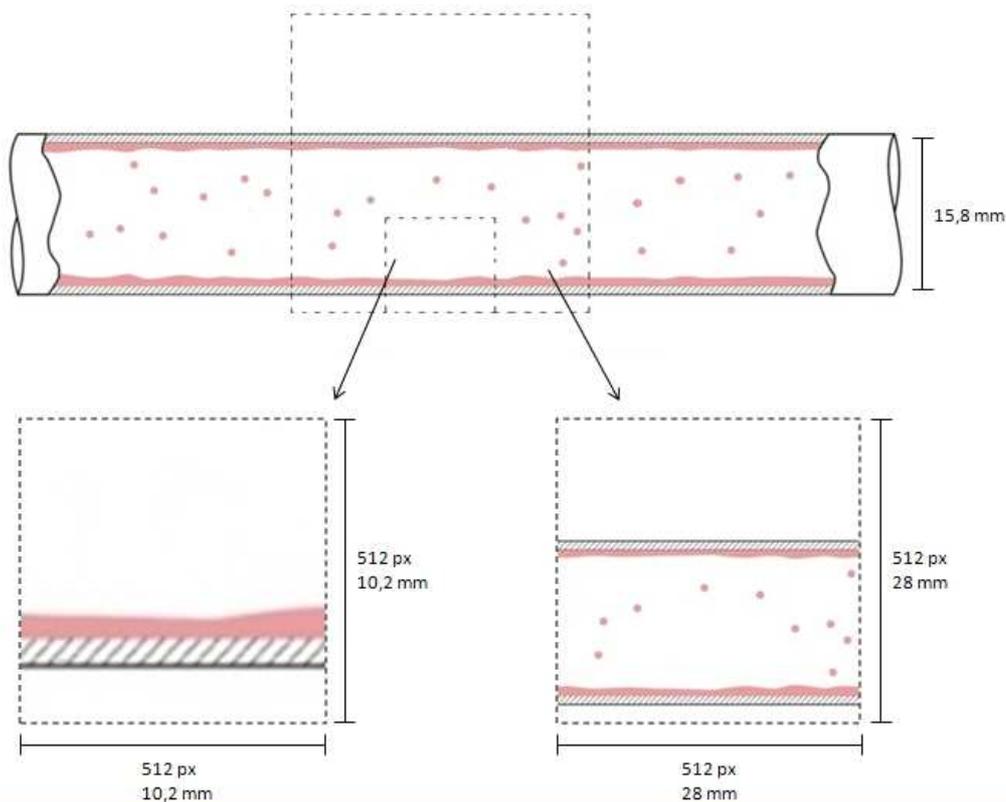


Figura 5.5 - Esquema das configurações ópticas aplicadas nos testes longitudinais para a seção de 15,8 mm de diâmetro.

Sempre houve preocupação de que pelo menos metade do tubo fosse capturado pela câmera para evitar que alguma grande onda não fosse registrada. A resolução máxima da câmera é 1280x1024 *pixels*, entretanto a resolução utilizada para todos os casos conduzidos na seção de 15,8 mm foi de 512x512 *pixels*. Devido a uma limitação de memória da câmera, a resolução da imagem foi diminuída para aumentar o número de imagens armazenadas, melhorando a resolução temporal e, conseqüentemente, a incerteza no cálculo das grandezas estatística relevantes para o fenômeno.

Para a seção de testes com tubo de 50,8 mm de diâmetro, a sua maior dimensão tornou necessária a utilização de lente que gerasse uma menor ampliação da imagem, acarretando em uma resolução espacial de 21,7 *pixel/mm*. Nesta configuração, a incerteza na medição de espessura instantânea de filme é maior.

Uma alternativa para melhorar a resolução espacial seria aumentar o tamanho da imagem de 512x512 para 1280x1024 *pixels*, aumentando a ampliação, sem comprometer o campo de visão de pelo menos metade do tubo. Essa alternativa foi descartada, pois limitaria o tempo de amostragem à metade, devido ao tamanho fixo da memória da câmera, o que afetaria a resolução temporal da medida de espessura de filme líquido.

Nesta seção de testes, para o cálculo da velocidade de propagação das ondas, utilizaram-se imagens com uma resolução de 512x1280 *pixels*, com a mesma ampliação aplicada para a extração de espessura de filme, o que resulta em uma calibração de 21,7 *pixel/mm*.

A Figura 5.6 ilustra um esquema da seção de testes de 50,8 mm de diâmetro para a melhor compreensão da região de interesse, configurações ópticas e resoluções aplicadas a cada caso estudado para obtenção das imagens longitudinais.

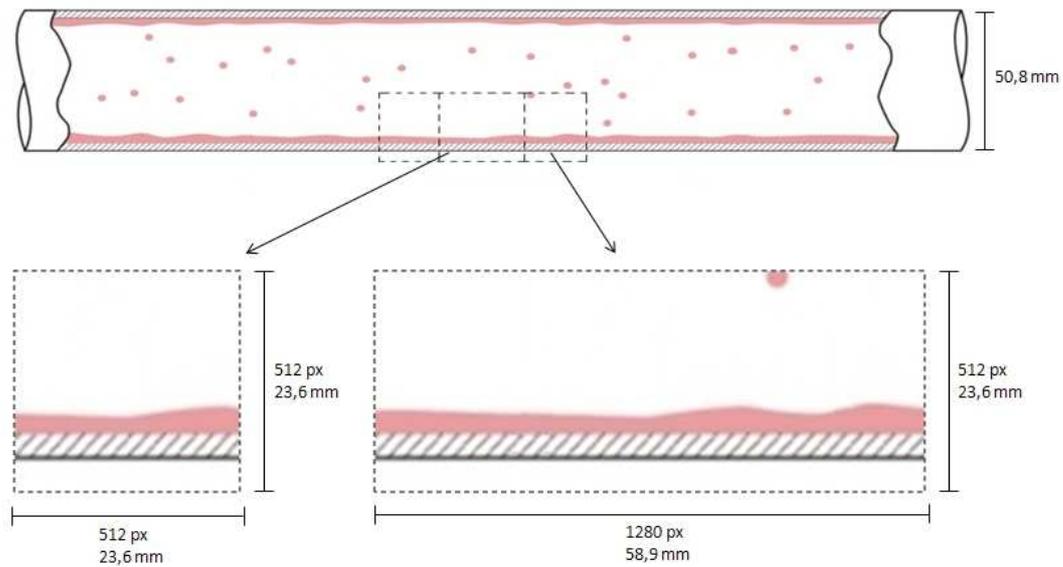


Figura 5.6 - Esquema das configurações ópticas aplicadas nos testes longitudinais para a seção de 50,8 mm de diâmetro.

A Tabela 5.1 resume as informações relativas à calibração espacial gerada por cada configuração óptica utilizada, assim como o tempo e a frequência de aquisição para captura de imagens utilizadas em cada experimento.

Tabela 5.1 - Configurações ópticas utilizadas cada caso estudado.

Diâmetro (mm)	Frequência (Hz)	Lente Objetiva (mm)	Resolução (pixel)	Tempo (s)	Calibração (pixel/mm)	Variável Medida
15,8	250	105	512 x 512	52,4	50,00	Espessura
15,8	3000	60	512 x 512	4,4	18,25	Velocidade
50,8	250	60	512 x 512	52,4	21,70	Espessura
50,8	3000	60	1280 x 512	4,4	21,70	Velocidade

A Figura 5.7 mostra uma sequência de imagens típicas do filme inferior obtida utilizando-se a técnica de *PLIF* desenvolvida. A sequência de imagens foi obtida com uma frequência de aquisição de 3000 quadros por segundo.

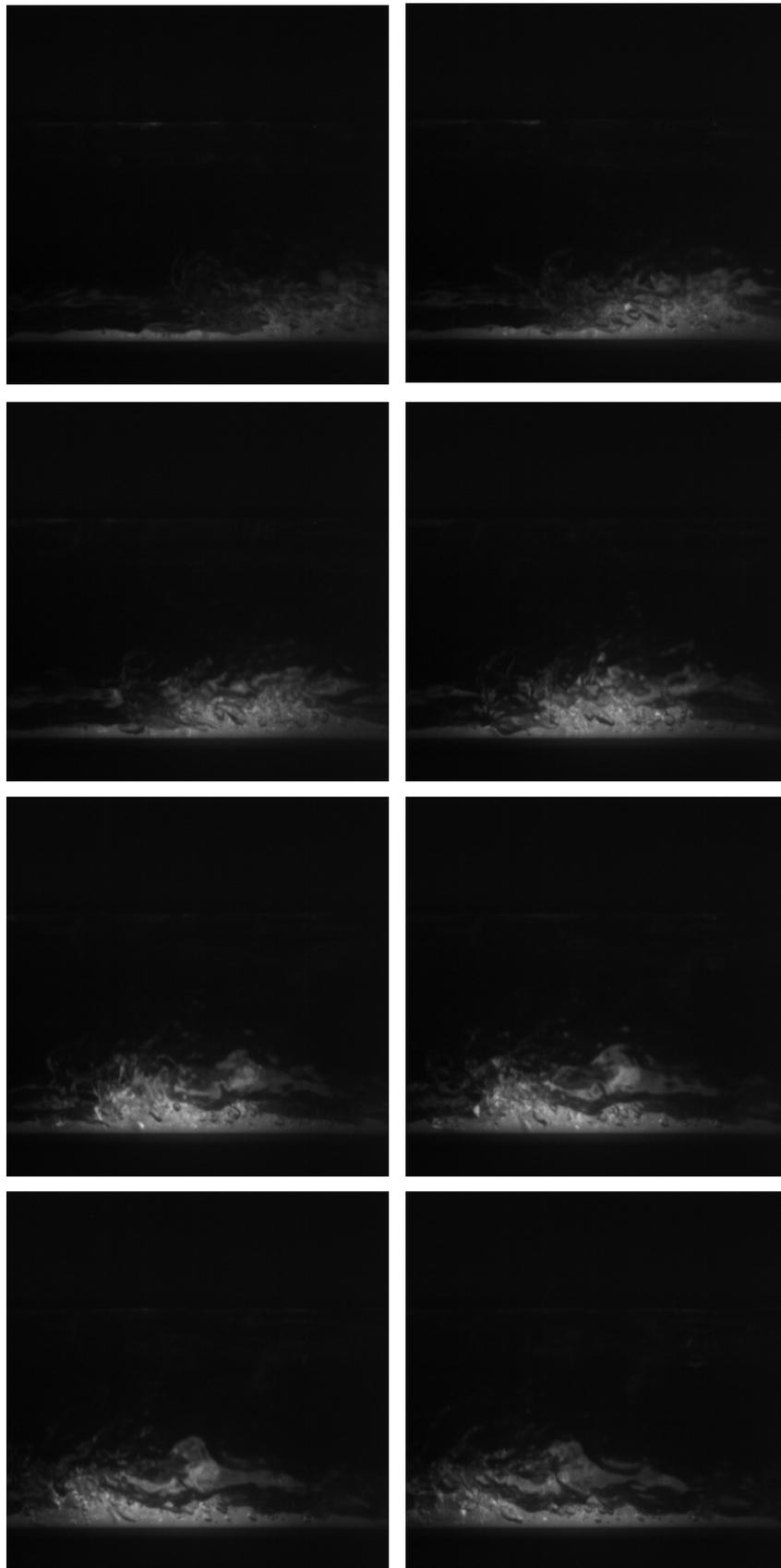


Figura 5.7 - Sequência de imagens longitudinais típicas do filme inferior obtidas a 3000Hz (sentido do escoamento da direita para esquerda).

O procedimento de processamento digital de imagens desenvolvido para identificar a região ocupada pelo filme líquido inferior em cada imagem será explicado na seção a seguir.

5.2. Processamento de Imagens Longitudinais

Devido ao elevado número de imagens adquiridas em cada caso estudado, os dados de espessura do filme foram obtidos por um procedimento automatizado baseado em um processamento digital de imagens. A tarefa das rotinas de processamento é fornecer a espessura do filme de líquido em uma ou mais posições axiais especificadas em cada quadro capturado pela câmera digital. Para que seja possível a realização das medições de espessura de filme, é necessário que as imagens sejam pré-processadas com o objetivo de melhorar o contraste da interface líquido-gás. Caso esta operação não seja realizada, a medição automatizada das espessuras pode fornecer erros consideráveis devido à pouca definição normalmente associada às imagens de escoamentos de mais de uma fase, ruídos e variação de intensidade luminosa.

O programa para realizar o processamento digital das imagens foi desenvolvido em linguagem MATLAB[®], desempenhando as tarefas descritas a seguir:

- a) Definição da posição e largura das sondas axiais de medição.
- b) Leitura das imagens originais capturadas pela câmera de alta velocidade.
- c) Pré-processamento através da equalização do histograma das imagens.
- d) Determinação da posição da parede interna do tubo.
- e) Binarização da imagem pré-processada.
- f) Avaliação da espessura do filme líquido na região de cada sonda de medição, através da identificação da fronteira gás-líquido na imagem binarizada.
- g) Aplicação da calibração nos resultados obtidos para a espessura do filme.

A seguir serão descritas as etapas de processamento de imagem realizadas pelo programa desenvolvido para extrair a espessura de filme líquido em cada quadro capturado.

5.2.1. Definição da Posição e Largura das Sondas de Medição

No presente trabalho a sonda de medição é definida como sendo a região em uma dada imagem digital do escoamento onde se realiza a medição da espessura do filme de líquido. O esquema da Figura 5.8 auxilia na definição da sonda. Na figura pode-se observar uma imagem esquemática de uma onda de líquido sobre a parede inferior do tubo, capturada pelo sensor digital da câmera. Os *pixels*, que representam a menor unidade de resolução do sensor digital, são mostrados esquematicamente como pequenos quadrados no fundo cobrindo todo o campo de visão da imagem. Cada uma das duas sondas mostradas na figura é indicada por um par de linhas verticais mais grossas ligando a parede inferior com a superior do tubo horizontal. As sondas possuem, respectivamente, larguras l_{s1} e l_{s2} , estando afastadas de uma distância axial d_s . A utilização de duas sondas decorre da necessidade de medição da velocidade de propagação das ondas, pelo método de correlação cruzada dos sinais de espessura de filme, que será explicado no Capítulo 7.

A espessura do filme líquido medida, $h(t)$, é avaliada como a média da altura das colunas de *pixels* que definem a sonda de medição. A decisão se um dado *pixel* pertence ao líquido ou ao gás depende do método de binarização, como será descrito na Seção 5.2.4.

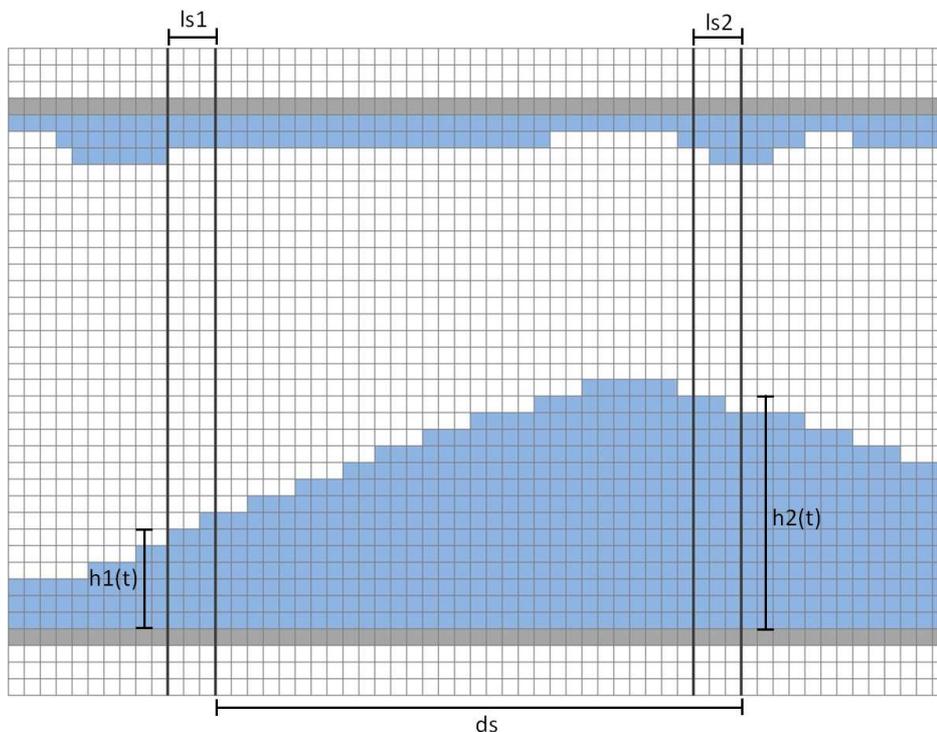


Figura 5.8 - Representação esquemática das sondas de medição da espessura do filme de líquido sobre uma imagem digitalizada.

Conforme observado em testes anteriores, verificou-se que a largura de sonda utilizada correspondendo à mínima possível – um *pixel* – produzia sinais de espessura de filme com variações bruscas, o que gerava um sinal com elevado nível de ruído. A largura da sonda funciona como um filtro espacial de média aplicado ao sinal de espessura do filme de líquido. A largura da sonda definida para o processamento de todos os casos estudados foi de 0,5 mm.

Deve-se mencionar que uma sonda física do tipo resistiva ou capacitiva possui também uma espessura finita, produzindo assim resultados integrados espacialmente na dimensão de sua espessura. Além disso, sondas físicas apresentam tempos de resposta finitos, o que limita a resolução temporal das variações de amplitude da espessura de filme de líquido que podem ser medidas. No caso das medições ópticas realizadas no presente trabalho, o tempo de resposta é definido pelo tempo de sensibilização dos sensores das câmeras digitais, que pode ser considerado desprezível quando comparado aos tempos característicos do fenômeno de passagem de onda em estudo.

5.2.2. Aumento de Contraste

Com o objetivo de melhorar o contraste da interface líquido-gás nas imagens adquiridas foi implementada uma rotina de pré-processamento em linguagem MATLAB[®] para equalização do histograma para cada imagem. A seguir será apresentada uma descrição breve da evolução no estudo de melhoria do pré-processamento das imagens e a descrição do procedimento utilizado.

O histograma de intensidade luminosa apresenta a distribuição da frequência de ocorrência de tons de cinza de uma dada imagem. Basicamente, o algoritmo desenvolvido realiza uma transformação não linear no histograma da imagem original que, em nossa aplicação, geralmente se apresentava comprimido, não utilizando toda a faixa de tons de cinza disponíveis no sensor da câmera. Além disso, devido à presença de múltiplas reflexões nas superfícies curvas que formam a interface gás-líquido, a imagem inevitavelmente apresenta pontos de extrema intensidade luminosa, o que dificulta a definição de um valor de limiar (*threshold*) adequado para operações de binarização da imagem. A Seção 5.2.4 dedica-se à descrição do processo de binarização. Além disto, as imagens capturadas algumas vezes apresentam regiões no filme de líquido mais escuras que outras. Isto pode ser explicado pelas imperfeições no material da

parede do tubo e variações espaciais da intensidade do plano de laser acarretando em variações no nível de cinza em algumas regiões das imagens.

Assim, a transformação implementada busca ajustar automaticamente os extremos de luminosidade de forma a distribuir igualmente os tons de cinza da imagem ao longo de toda a faixa dinâmica do sensor, saturando os máximos e mínimos de luminosidade, que passam a fornecer, na saída do processamento, os valores “1” e “0”, respectivamente. O resultado desta transformação é uma imagem com melhor brilho e contraste acentuado, o que facilita na detecção da posição da interface líquido-gás.

A Figura 5.9 apresenta uma imagem típica do filme de líquido visualizada longitudinalmente utilizando a técnica *PLIF* juntamente com seu histograma de tons de cinza. Como pode ser visto no seu histograma, o número de *pixels* com valores acima de 0,7 é desprezível, com a maioria concentrada na faixa entre 0 a 0,6.

O processamento preliminar de imagem era baseado em filtros medianos espaciais para a redução de ruído nas imagens e preservação dos contornos do filme de líquido. Além disto, uma equalização adaptativa global do histograma da imagem era utilizada para realçar o contraste (MATLAB, 2008). Este processamento gerava uma imagem muito clara no centro e escura nas bordas, com o histograma bastante desbalanceado.

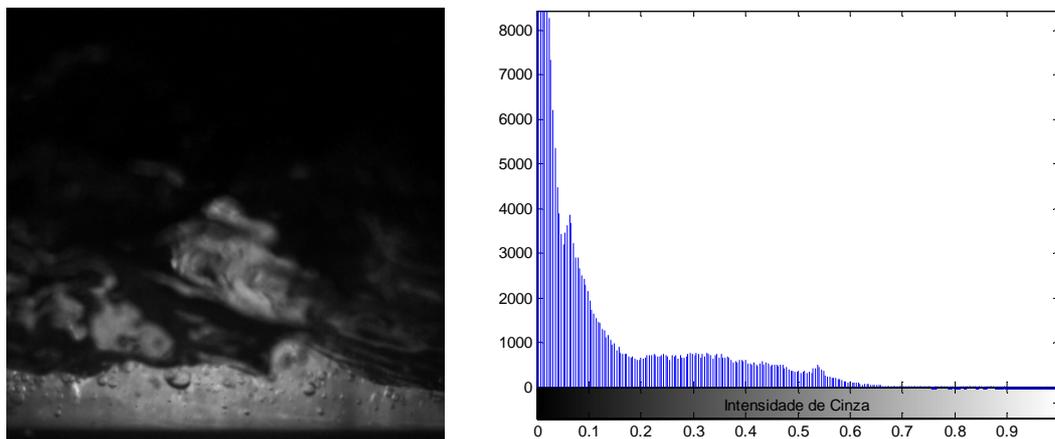


Figura 5.9 - Imagem original típica capturada e o histograma correspondente.

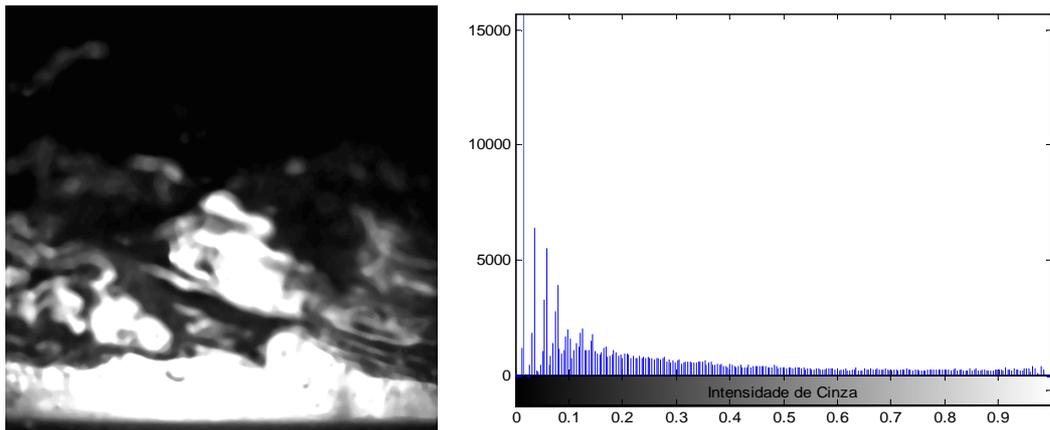


Figura 5.10 - Imagem pré-processada utilizando filtros medianos e equalização adaptativa global e o histograma correspondente.

Como pode ser observado na Figura 5.10, o procedimento aplicado não resolveu o problema de não uniformidade na iluminação e a interface gás-líquido não apresentou melhor definição como o esperado.

O desbalanceamento do histograma das imagens pré-processadas foi corrigido por uma equalização de histograma, baseada em uma função sigmóide adaptativa. Esta função transforma os níveis de cinza acima e abaixo de valores pré-determinados para os níveis de cinza máximo e mínimo disponíveis no sensor da câmera, ou seja, “1” e “0”, respectivamente. O histograma de nível de cinza da imagem resultante apresenta um maior número de *pixels* concentrados nos valores extremos, altos e baixos, com poucos *pixels* apresentando valores intermediários. Esse tipo de histograma facilita a determinação de um limiar para realizar a binarização, que se segue a esse processo.

Uma característica particular da equalização de histograma empregada neste trabalho foi à aplicação do processo em cada coluna da imagem, ao invés de em toda a imagem globalmente. Com isso, apenas os valores máximos e mínimos de cada coluna influenciam a equação de equalização da região. Desta forma, a equalização torna-se mais robusta e imune às variações de luminosidade no plano do laser e a outros possíveis defeitos de iluminação em diferentes pontos da imagem. A equação 5.1 abaixo descreve a curva aplicada, em cada coluna, nas imagens para equalização do histograma.

$$I_y = 0,5 + 0,5 \cdot \beta \cdot \left(\frac{e^{I_x} - e^{-I_x}}{e^{I_x} + e^{-I_x}} \right) \quad (5.1)$$

onde, os parâmetros β e I_x são dados pelas equações a seguir.

$$\beta = \frac{e^{\alpha} + e^{-\alpha}}{e^{\alpha} - e^{-\alpha}} \tag{5.2}$$

$$I_x = 2 \cdot \alpha \cdot (I - I_{med}) \tag{5.3}$$

O parâmetro α indica a inclinação da sigmóide, I é a intensidade de cinza de cada *pixel* da imagem original e I_{med} é dado pela equação:

$$I_{med} = b \cdot I_{max} + (1 - b) \cdot I_{min} \tag{5.4}$$

onde, b indica o valor da abscissa onde a sigmóide é centrada, e I_{max} e I_{min} são respectivamente as intensidades máximas e mínimas dos *pixels* da coluna.

Como pode ser observado, I_{med} é então uma média da intensidade da coluna ponderada pelo parâmetro b da sigmóide escolhido. Variando-se os parâmetros α e b obtêm-se configurações diferentes da curva de equalização. O comportamento da curva com a variação de b e α é apresentado na Figura 5.11. Após vários testes, concluiu-se que uma equalização mais suave ($\alpha=4$) apresentou melhores resultados.

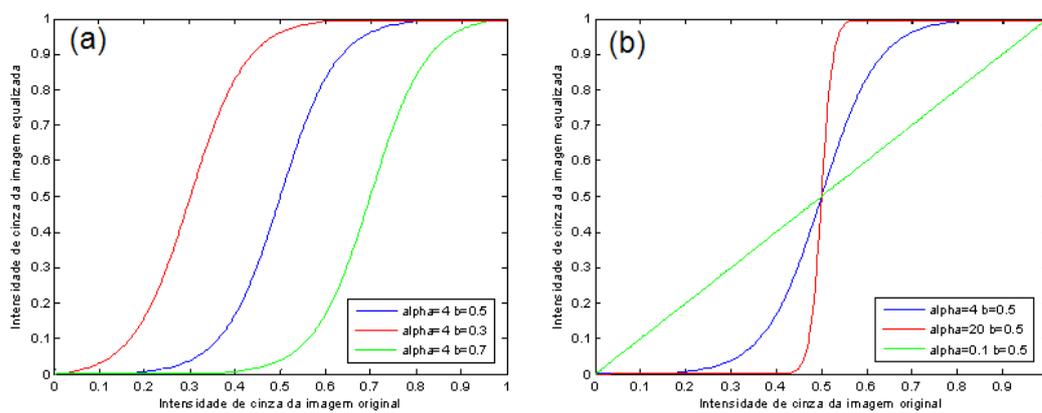


Figura 5.11 - (a) Curva de equalização do histograma para α constante. (b) Curva de equalização do histograma para b constante.

Observando a curva de equalização das imagens, notou-se que, em algumas destas, a equalização não utilizava todos os níveis de cinza, ou seja,

intensidades de “0” a “1”. Isso pode ser explicado uma vez que nem todas as imagens possuíam em todas as colunas as intensidades mínimas e máximas, valores “0” e “1”, respectivamente. Para isso, um ajuste foi necessário para que a curva resultante fosse expandida para os valores extremos do histograma, garantindo uma perfeita equalização para toda gama de intensidade de cinza. A equação 5.5 abaixo descreve a correção de normalização aplicada à curva.

$$I_{y_{norm}} = (I_y - Lim_{med}) \cdot \varphi + 0,5 \quad (5.5)$$

onde, I_y é a intensidade de cinza do *pixel* em uma determinada coluna dada pela equação 5.1. Lim_{med} e o fator de expansão, φ , são calculados pelas equações 5.6 e 5.7, respectivamente.

$$Lim_{med} = \frac{Lim_{sup} + Lim_{inf}}{2} \quad (5.6)$$

$$\varphi = \frac{1}{Lim_{sup} - Lim_{inf}} \quad (5.7)$$

onde, Lim_{inf} é o mínimo de intensidade de cinza de I_y e Lim_{sup} é o máximo de intensidade de cinza de I_y .

A Figura 5.12 ilustra a comparação entre a curva de equalização sem normalização, em vermelho, e a curva de equalização normalizada, em verde. Pode-se observar que a curva de equalização sem normalização, não expandiu os níveis de cinza da imagem original para os extremos de intensidade “0” e “1”.

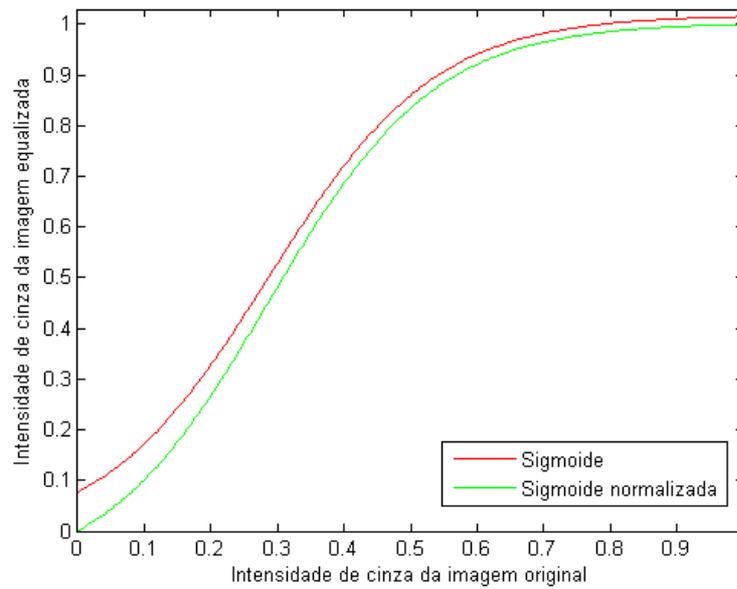


Figura 5.12 - Comparação entre a curva de equalização do histograma com e sem normalização.

A Figura 5.13 apresenta a curva de equalização de histograma aplicada à imagem ilustrada na Figura 5.9. A abscissa se refere às intensidades de cinza de uma dada coluna da imagem original e a ordenada indica a correspondência deste valor após a equalização do histograma.

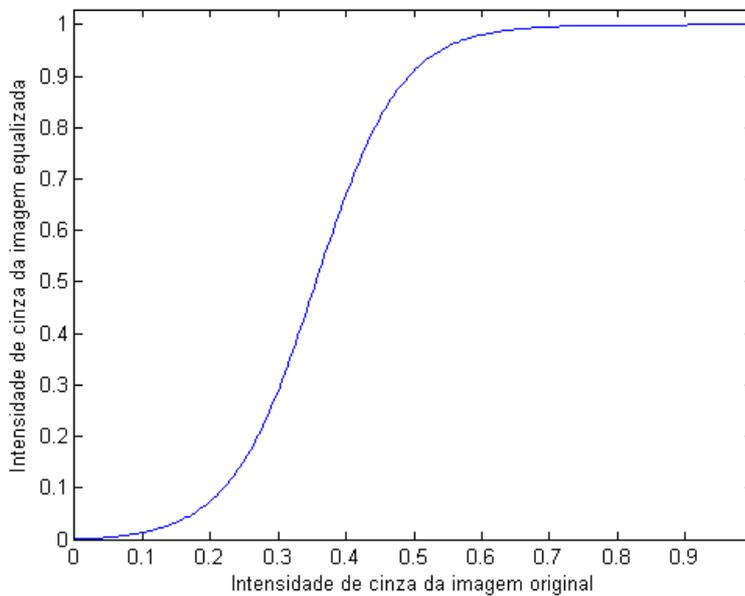


Figura 5.13 - Curva de equalização do histograma utilizada na imagem da Figura 5.9 para $\alpha=4$ e $b=0,5$.

Como pode ser observado na Figura 5.14, a imagem após aplicação de equalização, correspondente a curva da Figura 5.13, em todas as colunas revelou-se mais nítida e com a interface gás-líquido mais bem definida. Nota-se também que o histograma da imagem resultante distribuiu-se em toda gama de níveis de cinza, entre “0” e “1”, conforme o desejado.

Entretanto, surgiram algumas franjas escuras na Figura 5.14 devido a picos de intensidade de cinza em regiões restritas ou pontuais nestas colunas. Estes pontos fazem com que a sigmóide de equalização do histograma desvalorize o maior número de pontos, que possuem intensidade de cinza mais baixa, escurecendo a coluna. Isto acontece, pois o procedimento de cálculo utiliza o valor máximo e mínimo de intensidade para projetar a curva. Às vezes estes valores extremos são iluminações abruptas ou *pixels* superexpostos pela iluminação que acabam desviando a curva desvalorizando o filme de líquido, região que realmente interessa.

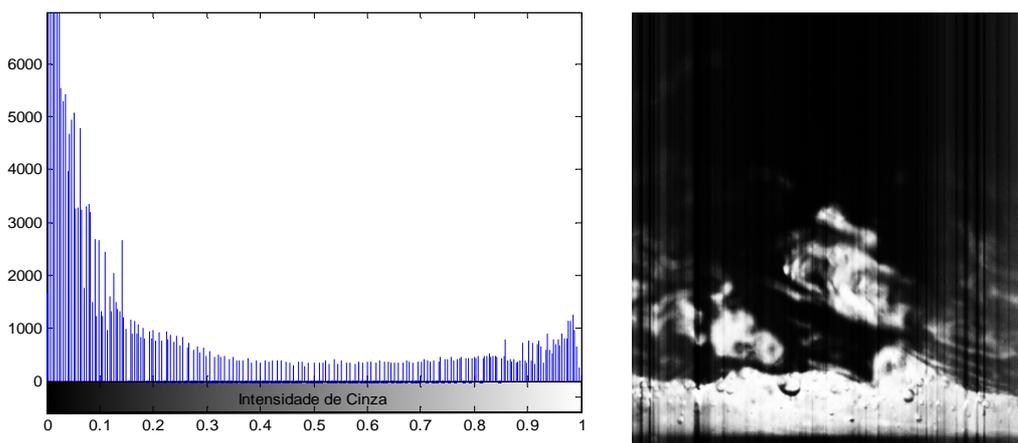


Figura 5.14 - Imagem processada utilizando a função sigmóide adaptativa para equalização do histograma por coluna e o seu histograma correspondente.

Para corrigir o problema das franjas foi criado um filtro de duas etapas. Na primeira etapa, o valor máximo da intensidade na equação 5.4, I_{max} , em cada coluna é substituído por I_{max}^* . Este parâmetro é dado pelo mínimo entre os valores de intensidade máxima das n colunas adjacentes ($n/2$ colunas anteriores e $n/2$ colunas posteriores, ou seja, filtro de banda $n/2$). Na segunda etapa, o valor da intensidade máxima da coluna para a equação da sigmóide de equalização, é substituído por I_{max}^{**} . Este parâmetro é dado pela média dos m máximos adjacentes (filtro passa baixa de banda $m/2$) de I_{max}^* , obtidos na primeira etapa. A equação para I_{med} torna-se então:

$$I_{med} = b \cdot I_{max}^{**} + (1-b) \cdot I_{min} \quad (5.8)$$

A primeira etapa elimina as franjas, enquanto a segunda torna a transição de níveis de cinza entre as colunas mais suave. A Figura 5.15 apresenta em azul os valores máximos das intensidades de cinza de cada coluna para toda a imagem original. A curva em vermelho, na mesma figura, se refere ao resultado do processamento utilizando os valores máximos das intensidades, I_{max}^{**} , utilizados na equação para a equalização de cada coluna. Pode-se observar que houve uma suavização dos valores máximos de intensidade garantindo uma melhora na transição da equalização entre colunas. Após alguns testes, os valores de n e m que obtiveram melhores resultados para o filtro do procedimento de pré-processamento das imagens foram 10 e 30, respectivamente.

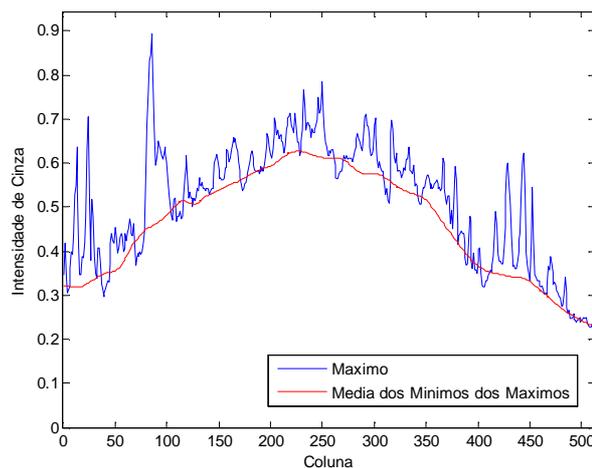


Figura 5.15 - Filtro aplicado a cada coluna da imagem da Figura 5.9 para redução de franjas.

A Figura 5.16 mostra o efeito na imagem depois da aplicação da equalização do histograma utilizando a função e o filtro nas colunas descritos acima e seu histograma correspondente. O contraste da imagem aumentou significativamente, e uma binarização pode ser facilmente realizada, como será mostrado na Seção 5.2.4, uma vez que limiar de corte pode ser identificado na região central do histograma.

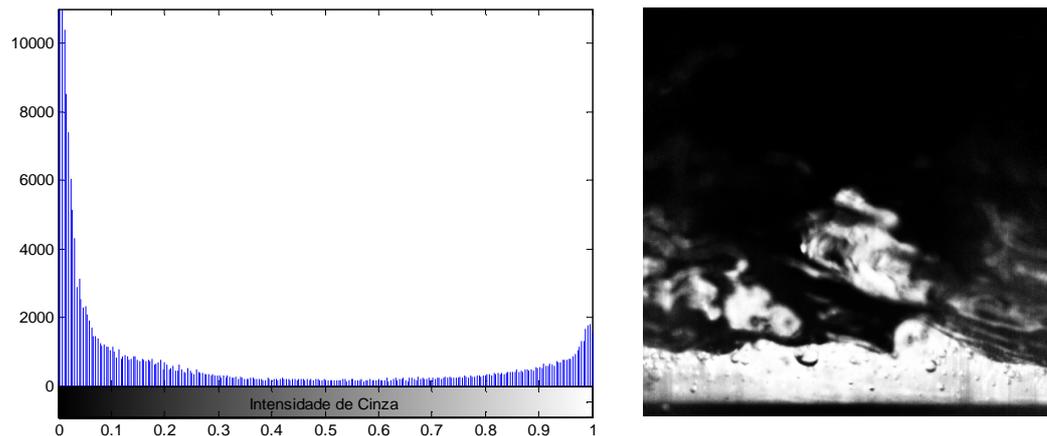


Figura 5.16 - Imagem equalizada com função sigmóide em cada coluna da imagem após a utilização do filtro para suavização das franjas e o histograma correspondente.

Com o objetivo de diminuir o tempo de computação, optou-se por realizar a operação de equalização de histograma somente nas regiões da imagem que foram previamente selecionadas como sendo as regiões das sondas de medição. Na região retangular que define cada sonda de medição, a operação de equalização do histograma era realizada sobre cada coluna que compunha a largura da sonda, possibilitando que a interface ficasse mais ressaltada, independentemente da diferença de iluminação da imagem global.

5.2.3.

Determinação da Posição da Parede Interna do Tubo

A determinação em *pixels* da parede do tubo também era informação essencial para o programa. Esta posição se refere ao início da contagem de espessura de filme líquido. Para determinar este valor, uma imagem típica do escoamento era capturada e, com o software de edição de imagem, *ImageJ*[®], a medição em *pixels* da parede interna do tubo era realizada.

5.2.4.

Medição da Espessura de Filme

A medição da espessura de filme líquido era realizada em imagens previamente equalizadas (pré-processadas) e binarizadas. A binarização consiste na escolha de um valor limite para a intensidade do nível de cinza da imagem (*threshold*) acima do qual os *pixels* passam a ter valor lógico “1”, sendo associados à fase líquida. Os *pixels* com níveis de cinza inferiores ao limiar de corte recebem o valor lógico “0”, sendo associados à fase gasosa.

O processo de binarização acarreta em variações abruptas da posição da interface, uma vez que escolhas diferentes para o valor limite de binarização implicam em mudanças discretas no cálculo de espessura do filme. Por isto, como já foi mencionado na seção anterior, o pré-processamento das imagens é de extrema importância, pois transforma o histograma da imagem original de forma que tons de cinza fiquem concentrados nos valores extremos (Figura 5.16). Sendo assim, uma ligeira variação do limiar de corte para a binarização, próximo à região central, não influencia significativamente na determinação da posição da interface.

Com as imagens já binarizadas, o cálculo da espessura é realizado, em cada coluna de *pixels* que forma a sonda de medição, somando-se todos os *pixels* de valor “1” a partir da posição da parede inferior do tubo, até que seja encontrado o primeiro valor lógico “0”, correspondente à fase gasosa. O valor da espessura do filme em cada sonda de cada imagem é calculado como a média da espessura, em *pixels*, de todas as colunas que compõem a região da sonda. Esse processo é realizado em todas as imagens capturadas, gerando a variação temporal da espessura, $h(t)$, para cada sonda de medição.

Para amenizar o problema da escolha do limiar de binarização para cada experimento, que anteriormente era fixo e subjetivo, este passou a ser iterativo. Escolhem-se algumas imagens do experimento para que sejam os padrões típicos, indica-se a posição da interface gás-líquido visualmente pelo usuário no ponto escolhido como sonda. A interface para cada imagem na sonda é calculada pelo programa, através de um cálculo iterativo de espessura de filme para diferentes valores de limiar, e seus erros com relação ao padrão são computados. O valor do limiar final é dado pela média aritmética dos limiares de cada imagem que obtiveram melhor aproximação da espessura de filme padrão, ou seja, menor erro.

É comum em imagens de filmes de escoamentos anulares a presença de bolhas de gás no filme de líquido. Estas bolhas apresentam na imagem níveis de cinza equivalentes ao da fase gasosa, que quando binarizada passam a ter nível lógico “0”. Este fato pode acarretar em uma determinação incorreta da posição da interface, pois o algoritmo pararia a contagem da espessura de filme líquido, quando a bolha fosse encontrada. Por esta razão, antes de ser iniciada a contagem vertical dos *pixels* com nível lógico “1” em uma dada coluna, utilizava-se um algoritmo para o preenchimento de vazios na imagem. Este algoritmo identifica regiões fechadas com nível de cinza zero dentro filme e as preenche com o valor lógico “1”, correspondente à fase líquida. Assim, após este

procedimento, o filme apresenta-se de forma contínua permitindo a medição de sua espessura. Neste trabalho utilizou-se uma função da biblioteca do MATLAB® denominada *imfill* para realizar a tarefa de preenchimento das regiões de bolhas no filme.

A média da espessura do filme líquido foi obtida através da média temporal da espessura de filme $h(t)$ em todo período de aquisição. Este valor contabiliza as grandes ondas, opondo-se ao critério adotado para a estimativa dos valores de espessura de filme líquido reportados por Schubring & Shedd (2009a), que apenas considera a variação de espessura do filme base. O desvio médio quadrático da espessura média de filme, valor *RMS*, foi calculado para complementar a caracterização estatística do escoamento.

A Figura 5.17(a) mostra a imagem resultante da operação de binarização utilizada aplicada à Figura 5.17, com um limiar de corte apropriado. Na Figura 5.17(b), uma linha vermelha, correspondente à espessura de filme líquido calculada pelo programa, foi superposta à imagem original, apresentada na Figura 5.9, para verificação. A concordância obtida é considerada excelente. As manchas brancas sobre o filme líquido, mas não conectadas a ele, são imagens de líquido fora do plano e não devem ser computadas como fazendo parte do filme de líquido.

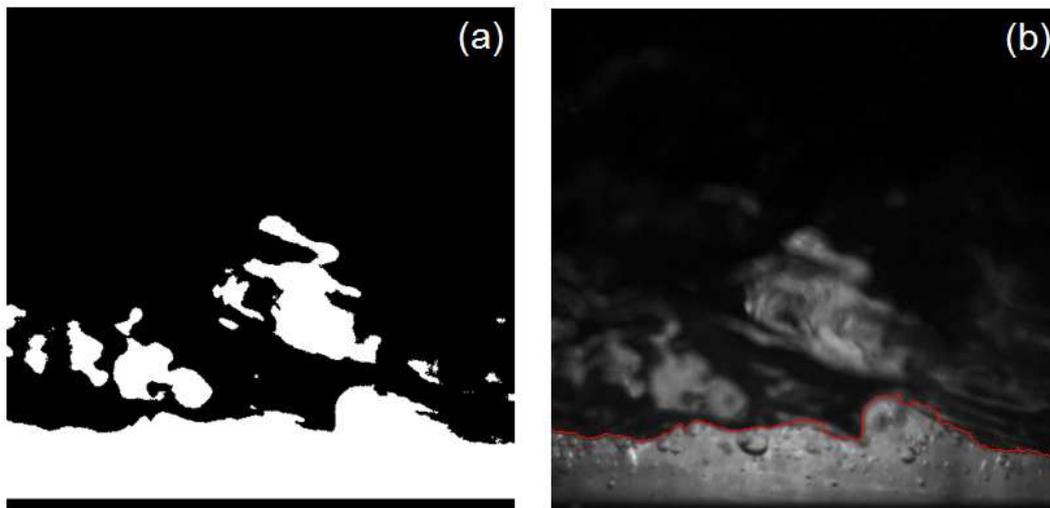


Figura 5.17 - (a) Imagem binarizada (b) Espessura de filme líquido medida superposta à imagem original.

A sequência de imagens da Figura 5.18 mostra a passagem de uma onda. Também podem ser vistos na figura dois marcadores, vermelho e azul, na interface ar-água. Esses são as espessuras de filme medidas pelo algoritmo de

processamento das imagens desenvolvido aplicado nas localizações das sondas. Esses marcadores foram superpostos às imagens originais para verificar a concordância com a interface identificada visualmente.

É importante mencionar que a observação da concordância dos marcadores com todas as imagens originais capturadas foi parte do procedimento experimental, onde pequenos desvios da posição da interface medida em relação à posição correta podiam ser facilmente identificados. Uma grande quantidade de quadros apresentando desvios seria um indicativo de escolha ruim dos parâmetros de pré-processamento e binarização das imagens. O número de imagens com desvios, entretanto, foram desprezíveis.

Recomenda-se ao leitor interessado acessar os Vídeos 1 e 2 em anexo à versão eletrônica da presente dissertação, disponível na biblioteca digital da PUC-Rio. As imagens da Figura 5.18 foram retiradas do Vídeo 1, que fornece informações riquíssimas sobre a dinâmica do escoamento anular, ainda não disponíveis na literatura internacional.

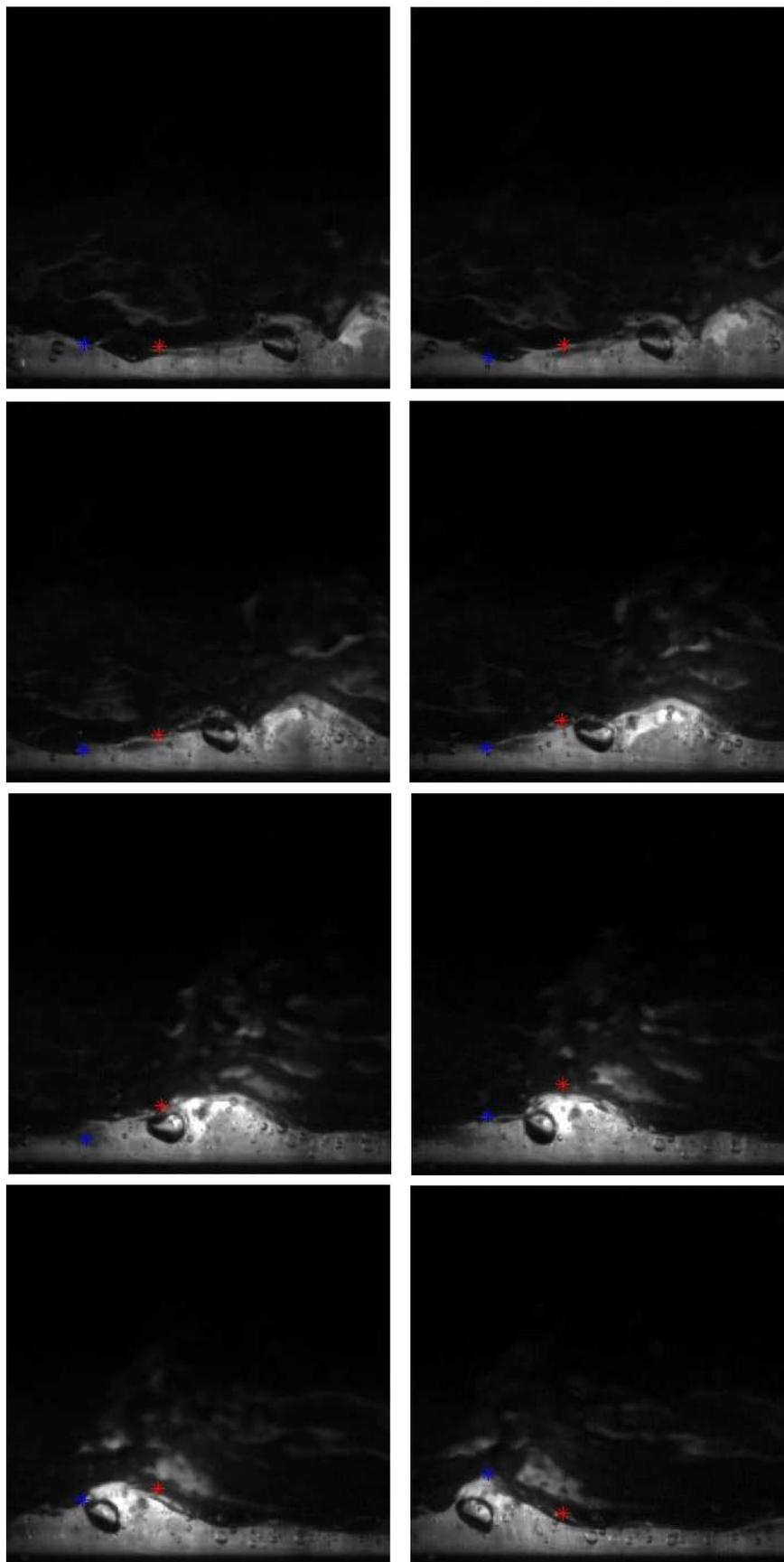


Figura 5.18 - Imagens longitudinais do filme líquido em função do tempo. Cruzes vermelha e azul indicam as espessuras de filme determinadas pelo procedimento de processamento de imagem desenvolvido.

A Figura 5.19 mostra um exemplo típico da variação temporal da espessura de filme líquido inferior obtido pelo programa de processamento de imagens. Este resultado corresponde à espessura de filme medido na região da sonda 1, para as velocidades superficiais de líquido e gás de 0,112 e 20 m/s, respectivamente. A presença de grandes ondas, *disturbance waves*, e de pequenas ondas de maior frequência, *ripples*, pode ser identificada em dados como os apresentados na figura.

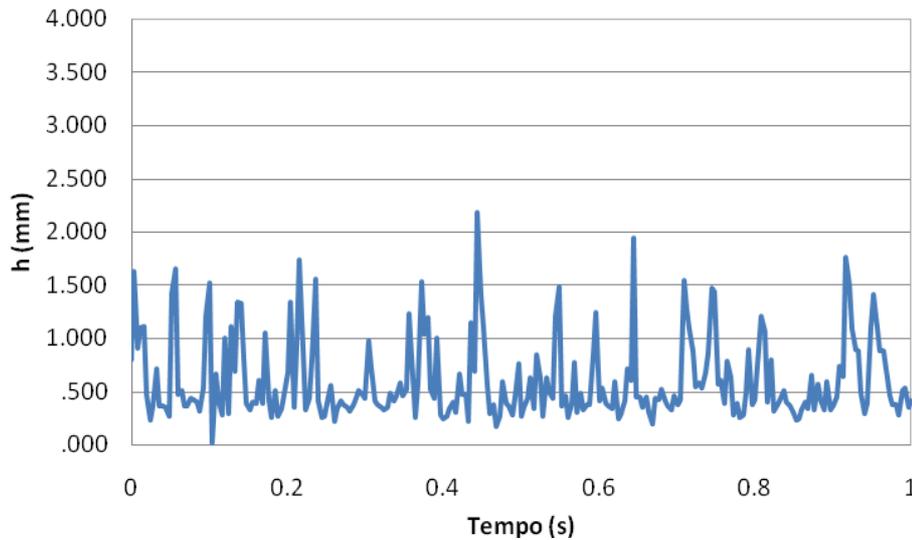


Figura 5.19 - Exemplo típico da variação temporal da espessura de filme líquido inferior determinado pelo procedimento de processamento de imagens desenvolvido ($U_s=0,112$ m/s e $U_{sg}=20$ m/s).