

## 6 Experimentos para Medição Transversal do Filme de Líquido

Com base nos resultados da aplicação bem sucedida da técnica *PLIF* na visualização longitudinal para determinação da variação temporal do filme de líquido inferior formado pelo escoamento anular horizontal, uma nova configuração foi proposta. Esta nova configuração objetiva obter a informação instantânea do filme de líquido na seção transversal do escoamento.

Neste capítulo serão descritos os procedimentos adotados para a realização dos experimentos estereoscópicos e o processamento digital de imagem elaborado para a extração de informações qualitativas e quantitativas do comportamento temporal do filme líquido na seção transversal do tubo.

### 6.1. Aquisição das Imagens Transversais

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

#### 6.1.1. Acionamento dos Equipamentos

O preparo inicial para o acionamento e configuração dos equipamentos como laser, sincronizador e câmeras foram os mesmos utilizados para a visualização longitudinal, descritos anteriormente no Capítulo 5. Porém, alterações foram realizadas no arranjo óptico para aplicação da técnica de visualização em configuração estereoscópica.

Imagens da seção transversal do filme líquido foram obtidas pela montagem óptica empregando duas câmeras de alta velocidade montadas em ângulo, como ilustrado no esquema da Figura 6.1. Neste caso, o plano de luz foi girado de 90°, em relação à configuração para visualização longitudinal, para iluminar a seção transversal do tubo.

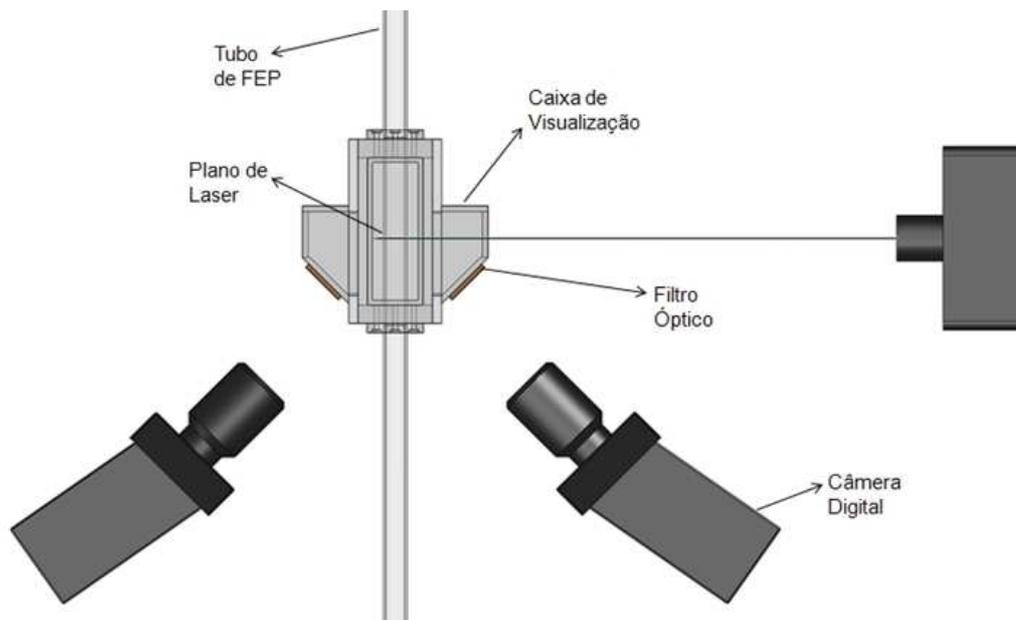


Figura 6.1 - Montagem óptica estereoscópica para a visualização da seção transversal do escoamento.

Duas câmeras *IDT Motion X3* foram montadas em um suporte giratório graduado permitindo que o ângulo de cada câmera fosse ajustado a  $45^\circ$  em relação ao eixo do tubo, observando a seção transversal do escoamento através de duas janelas inclinadas disponíveis na caixa de visualização. As faces das janelas da caixa de visualização foram projetadas para que as lentes objetivas das câmeras fossem ortogonais a estas, como explicado na Seção 4.1.6.3. O suporte da câmera também permitia que o corpo da câmera e seu sensor de imagem, fossem deslocados angularmente em relação ao eixo da lente que era mantido fixo a  $45^\circ$  com o eixo do tubo. Essa montagem permitiu a obtenção da chamada condição de *Scheimpflug* (Raffel et al., 2007). Esta condição é obtida quando os planos da lente, do CCD da câmera e do plano formado pelo feixe do laser se encontram em uma única linha. Quando esta condição óptica é alcançada, consegue-se que toda a imagem esteja em foco, apesar da câmera estar observando a seção transversal do tubo em ângulo.

### 6.1.2. Calibração das Imagens

Para realizar o processo de calibração da imagem, um alvo era inserido no tubo de teste de *FEP*, tendo sua face alinhada com o plano do laser. O alvo, mostrado na Figura 6.2, foi fabricado a partir de um cilindro de latão com

comprimento de 1 m. Uma malha padrão de pontos com espaçamentos regulares de 1,5 mm foi usinada na face do alvo, que foi posteriormente anodizada na cor preta. Os pontos da malha, com diâmetro de 0,5 mm, foram depois pintados de branco para produzir um bom contraste com o fundo anodizado em preto.

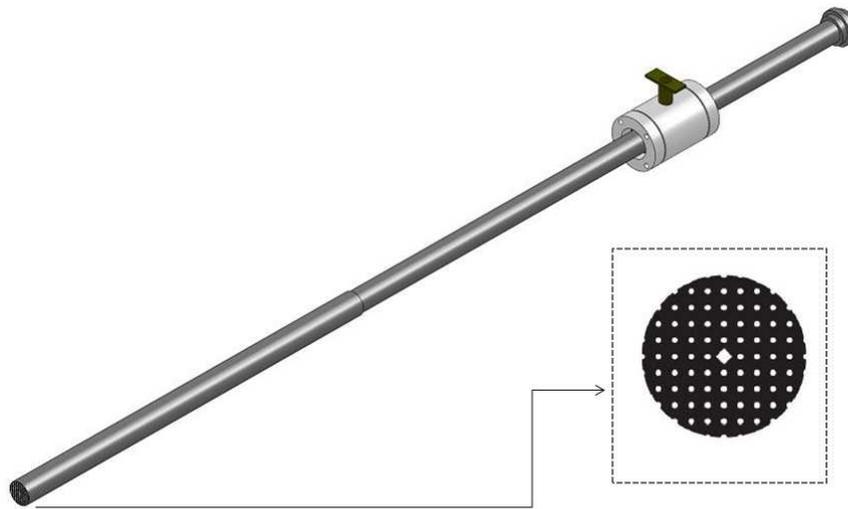


Figura 6.2 - Alvo para calibração de imagens estereoscópicas com destaque para a malha de pontos usinada e pintada de branco.

A Figura 6.3 ilustra o alvo de calibração posicionado dentro da caixa de visualização, alinhado com o plano do laser, sendo observado em ângulo através da janela lateral da caixa de visualização.

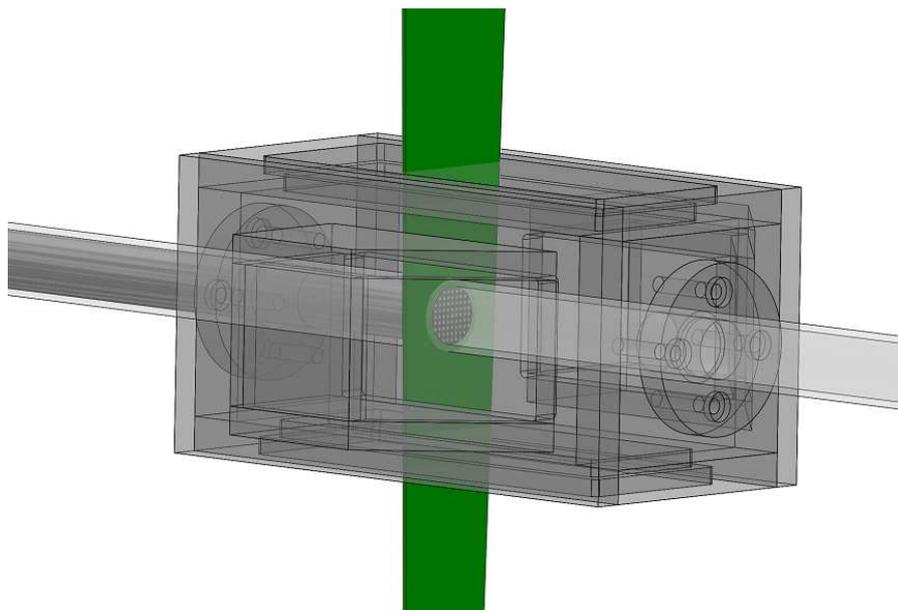


Figura 6.3 - Alvo de calibração posicionado dentro do tubo de testes e alinhado com o plano do laser.

O tubo de testes era então enchido com a mesma solução de água e rodamina usada nos testes e uma imagem do alvo era capturada com cada uma das câmeras, utilizando uma fonte de luz contínua externa de uma lâmpada fluorescente. As imagens apresentadas na Figura 6.4 são visualizações em ângulo da malha de pontos da face do calibrador dentro do tubo preenchido totalmente com a solução, obtidas pelas câmeras da esquerda e da direita.

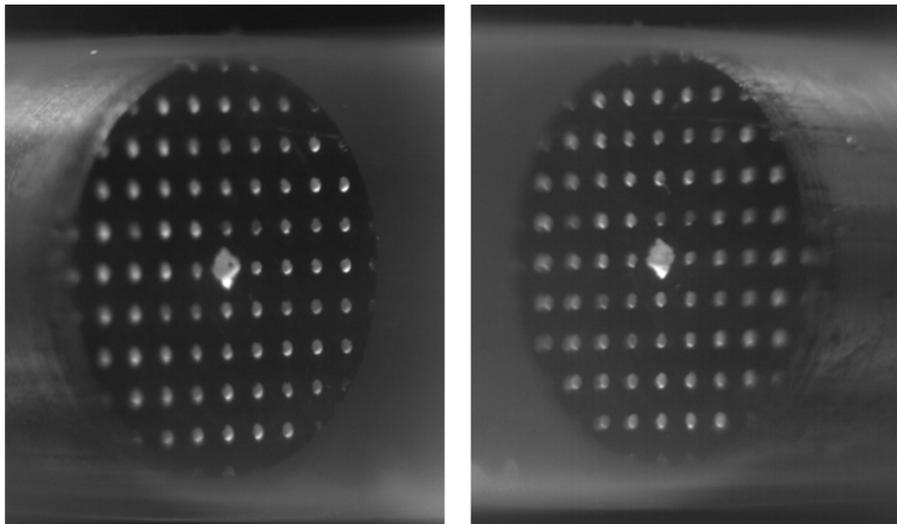


Figura 6.4 - Alvo de calibração posicionado dentro da seção de testes preenchida com a solução de água e rodamina. Imagens capturadas pelas câmeras da esquerda e da direita.

Um procedimento automático foi desenvolvido para distorcer as imagens obtidas com cada uma das câmeras. Após a distorção, as imagens apresentam uma visão equivalente àquela que seria obtida por uma câmera hipoteticamente situada no eixo da tubulação, observando frontalmente a seção reta do tubo. O procedimento de distorção, que será descrito na seção 6.1.3, gera um polinômio de distorção para cada câmera, que depois é aplicado em todas as imagens capturadas.

Após a distorção das imagens, uma operação de união das imagens da esquerda com a da direita era realizada formando a imagem completa da seção do tubo. As operações de união e pré-processamento das imagens serão descritas mais detalhadamente na Seção 6.2.4.

### 6.1.3. Procedimento de Distorção das Imagens de Calibração

Depois de capturadas as duas imagens do alvo, dois polinômios de distorção de imagens, um para a câmera da esquerda e outro para a da direita, eram obtidos através do procedimento de calibração. Nesta seção serão descritos os procedimentos adotados para a determinação destes polinômios.

O polinômio de distorção promove um mapeamento da imagem distorcida vista em ângulo para uma imagem frontal da seção reta do tubo. Essa rotina de distorção de imagens foi desenvolvida em linguagem MATLAB® com o auxílio do professor Raul Feitosa do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-RIO, utilizando o método de *Random Sample Consensus*, *RANSAC* (Fischler & Bolles, 1981).

*RANSAC* é um método iterativo para estimar parâmetros matemáticos de um modelo a partir de dados observados. É um algoritmo não determinístico proposto inicialmente por Fischler & Bolles (1981) que produz resultados razoáveis dependendo do número de iterações permitidas. Basicamente, assume-se que os dados observados consistem de pontos *inliers* – cuja distribuição pode ser explicada pelos parâmetros do modelo – e *outliers* – pontos classificados como ruído, incorretamente medidos ou com erro na interpretação dos dados. Este método é usualmente empregado em visão computacional para resolver, por exemplo, problema de correspondência na estimativa da matriz fundamental relacionada com o par de câmeras em configuração estereoscópica, como neste trabalho.

Em linhas gerais o método *RANSAC* pode ser resumido da seguinte forma:

- a) Inicialmente alguns pontos são selecionados aleatoriamente dentre aqueles observados.
- b) Estes pontos, considerados hipoteticamente *inliers*, são utilizados para um ajuste inicial do modelo através de transformação linear direta.
- c) Todos os demais pontos são testados contra o modelo ajustado. Caso um determinado ponto se ajuste bem a este modelo, ele também passa a ser classificado como hipoteticamente *inlier*.
- d) O modelo é então reestimado com todos os pontos classificados como *inliers*.
- e) Finalmente o ajuste é avaliado através do erro estimado entre os pontos hipoteticamente *inliers* e o modelo ajustado.

- f) O procedimento de (a) a (e) é repetido, determinado número de vezes, produzindo diferentes modelos ajustados.
- g) O modelo com menor erro e maior número de pontos hipoteticamente *inliers* é considerado o melhor ajuste para os pontos observados.

As imagens originais capturadas da esquerda e da direita do alvo apresentam-se deformadas devido ao ângulo de observação de cada câmera, como apresentado na Figura 6.4 acima. Em cada uma destas duas imagens os pontos da malha de calibração, pontos do domínio, são selecionados pelo usuário, como exemplificado em vermelho na Figura 6.5 para a imagem capturada pela câmera da esquerda. Estes pontos possuem correspondentes na imagem distorcida, pontos do contradomínio. Através do conhecimento do espaçamento real entre os centros dos pontos no alvo de calibração, ponto do contradomínio, uma matriz de transformação linear, para cada uma das câmeras, é obtida através do método de *RANSAC*. Esta matriz é responsável por distorcer a imagem levando os pontos do domínio nos pontos contradomínio. A Figura 6.6 apresenta a imagem do alvo visualizado pela câmera da esquerda da Figura 6.4 distorcida através do polinômio de calibração gerado pelo procedimento implementado.

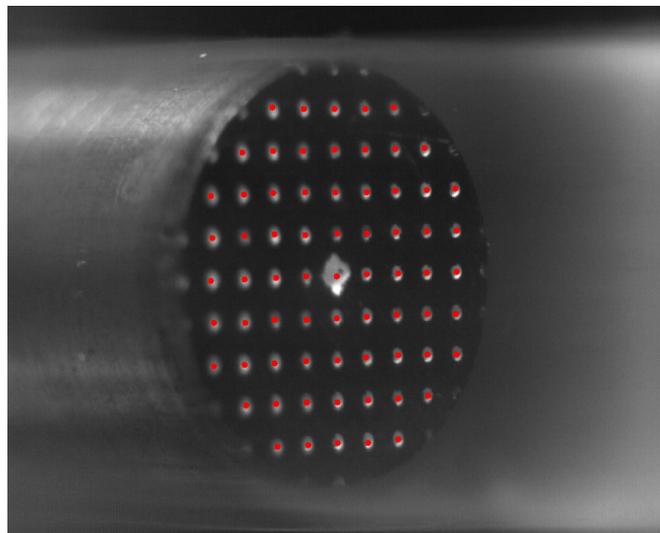


Figura 6.5 - Imagem do alvo de calibração com destaque para os pontos vermelhos referentes a seleção feita pelo usuário.

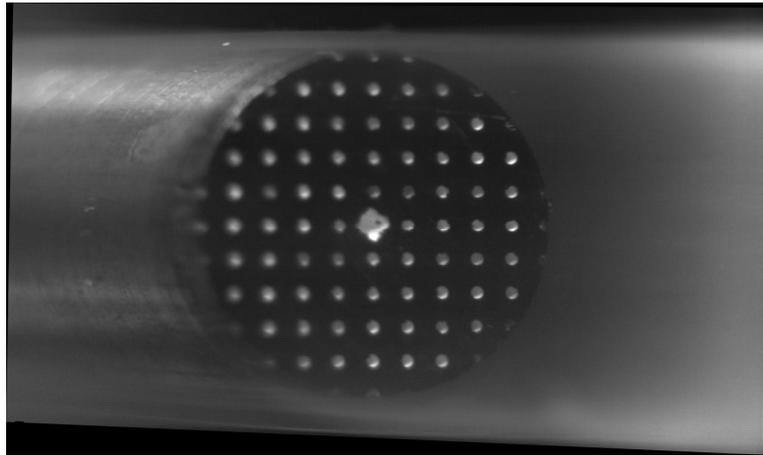


Figura 6.6 - Imagem do alvo de calibração distorcido após a aplicação do polinômio de distorção.

A Figura 6.7 apresenta o alvo distorcido com pontos em azul marcados. Estes pontos representam os pontos vermelhos da Figura 6.5 projetados na imagem já distorcida. Pode-se observar que houve uma boa concordância entre todos os pontos projetados e a imagem do contradomínio.

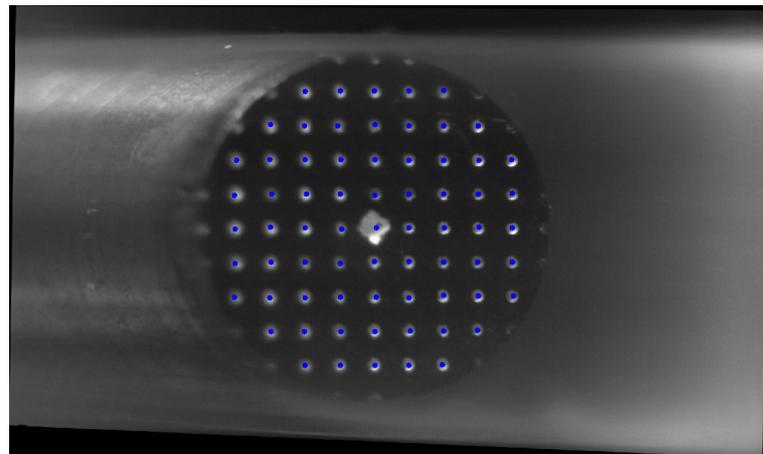


Figura 6.7 - Imagem do alvo de calibração com destaque nos pontos azuis que são projeções dos pontos anteriormente marcados pelo usuário em uma imagem com observação em ângulo.

#### 6.1.4. União das Imagens de Calibração

Após a distorção das imagens da direita e da esquerda, era aplicado um processo de união para formar a imagem completa instantânea da seção transversal do filme de líquido ao longo da parede do tubo.

Um perfeito alinhamento entre as duas câmeras não podia ser garantido. Por esta razão, as imagens capturadas pelas duas câmeras não apresentavam seus centros coincidentes entre si e também com o eixo do tubo. Para assegurar a perfeita união das imagens da esquerda e da direita, as coordenadas das posições do centro do alvo de calibração (losango) nas duas imagens distorcidas, eram registradas e serviam de guia para a uma correta sobreposição das imagens.

No processo de união das imagens a intensidade de cinza da imagem resultante era obtida pela média aritmética das intensidades de cinza das imagens da esquerda e da direita em cada posição correspondente. Após a imagem ter sido unida, era realizada uma equalização de histograma global para aumentar o brilho e o contraste, uma vez que o procedimento de união tende a escurecer a imagem. A Figura 6.8 mostra as imagens do alvo já distorcidas da esquerda e da direita, enquanto a Figura 6.9 apresenta a imagem resultante após o processo de união.

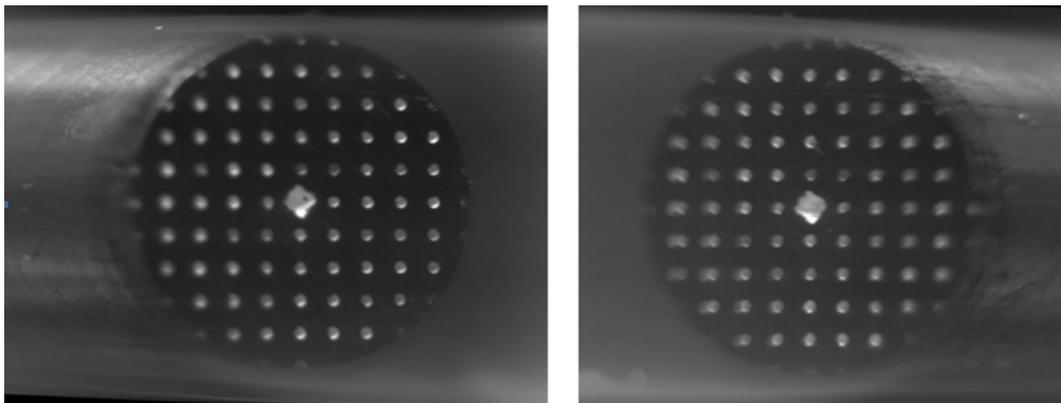


Figura 6.8 - Imagens do alvo de calibração da esquerda e da direita já distorcidas.

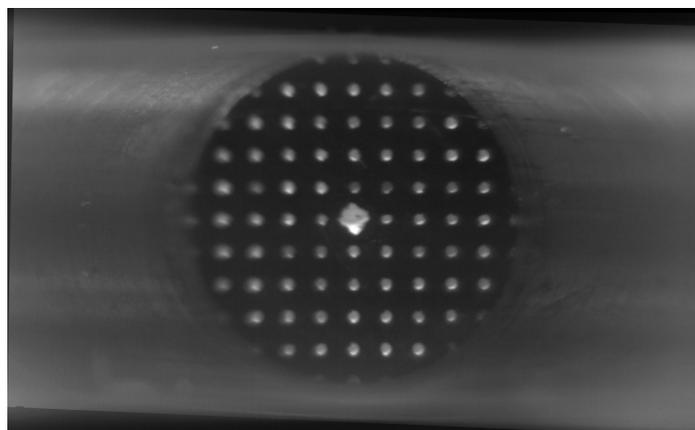


Figura 6.9 - Imagem do alvo de calibração resultante da união entre as imagens distorcidas obtidas com as câmeras da esquerda e da direita.

É relevante mencionar que as condições de calibração usando o tubo completamente preenchido com solução de água e rodamina são distintas das condições de escoamento. Nestas condições, o filme líquido escoava ao redor do tubo e o ar, carregado de gotículas, no centro. Devido às diferenças de caminho óptico entre a água e o ar, a imagem obtida por uma câmera, digamos a da direita, captura o filme de líquido na parede da direita e também na parede oposta do tubo, a parede esquerda. No entanto, a imagem da parede oposta é obtida através de um caminho óptico que inclui água e ar. Este caminho óptico é distinto daquele presente no processo de calibração, onde o tubo está totalmente preenchido com a solução de água e rodamina. Por esta razão, nos experimentos realizados, a imagem da parte direita do filme de líquido era capturada pela câmera direita e a parte esquerda do filme era capturada pela câmera esquerda.

A calibração da imagem em *pixel/mm* foi também calculada com o programa de edição de imagem *ImageJ®*, através da medição em *pixels* do espaçamento real conhecido entre os pontos do alvo da imagem resultante do processo de união, analogamente ao que foi descrito para a calibração da imagem longitudinal.

### **6.1.5. Captura das Imagens**

Com o calibrador retirado do interior do tubo, os experimentos com o escoamento anular eram realizados. Estas imagens gravadas tinham resolução de 1024x1280 *pixels*, para permitir que toda a imagem da seção reta do tubo fosse capturada. Estas imagens, devido ao ângulo de observação de cada câmera, eram distorcidas e unidas pelos procedimentos descritos anteriormente. As imagens foram capturadas com uma configuração de componentes ópticos que fornecia uma resolução de 57,3 *pixel/mm*.

Os ajustes da vazão de água e ar para as condições de operação, assim como os processos de alinhamento da seção de testes, seguiram os mesmos procedimentos adotados para o caso do arranjo preparado para a visualização longitudinal do filme de líquido. As velocidades superficiais escolhidas para estes testes foram as mesmas utilizadas nos testes longitudinais para a seção de 15,8 mm, de modo a permitir a comparação entre as duas técnicas de medição. A matriz de testes investigada é apresentada no Capítulo 8.

As imagens longitudinais demonstraram que a ampliação gerada por uma resolução espacial de  $512 \times 512$  *pixels* apresentava uma incerteza aceitável na medição do filme líquido, uma vez que apenas a região entre a parte inferior do tubo e a linha de centro do mesmo foi registrada. Entretanto, no caso da visualização da seção transversal do filme, cada câmera capturava a metade da seção transversal do tubo. Para garantir uma ampliação próxima àquela utilizada no arranjo longitudinal, e, ao mesmo tempo visualizar toda a região de interesse, foi necessário utilizar a máxima resolução espacial fornecida pela câmera,  $1024 \times 1280$  *pixels*. Com essa resolução espacial, a memória da câmera permitia que 6550 imagens fossem armazenadas, o que corresponde, para a frequência de aquisição de 250 Hz, a um registro máximo de 26 s para cada teste conduzido.

A Figura 6.10 apresenta as imagens do filme de líquido visualizado em ângulo pelas câmeras da esquerda e da direita. Cada câmera fornece então metade do escoamento da seção transversal no interior do tubo.

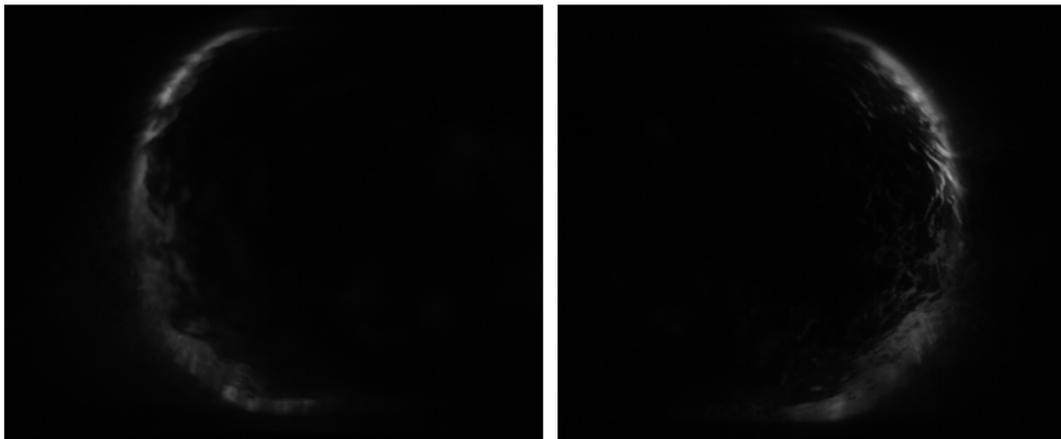


Figura 6.10 - Imagens observadas em ângulo do filme de líquido capturadas pelas câmeras da esquerda e da direita.

A Tabela 6.1 resume as informações relativas à calibração espacial gerada por cada configuração óptica, o tempo e a frequência de aquisição para captura cada experimento.

Tabela 6.1 - Configurações ópticas utilizadas cada caso estudado.

Frequência (Hz)	Lente (mm)	Resolução (px)	Tempo (s)	Calibração (px/mm)
250	60 + anéis	1280 x 1024	26,2	57,3
2000	60 + anéis	1280 x 1024	3,3	57,3

O procedimento de processamento digital de imagens utilizado para distorcer as imagens e identificar a região ocupada pelo líquido na imagem transversal resultante será descrito com detalhes na Seção 6.2.

## 6.2.

### Processamento das Imagens Transversais do Filme de Líquido

Serão descritos nesta seção os procedimentos de processamento automático empregados nas imagens transversais capturadas para determinação da distribuição circunferencial instantânea da espessura do filme líquido. As principais etapas realizadas pelo programa desenvolvido são:

- a) Definição da posição e largura da sonda de medição.
- b) Leitura das imagens originais capturadas pela câmera.
- c) Equalização global do histograma das imagens da esquerda e da direita.
- d) Distorção das imagens através dos polinômios obtidos na calibração.
- e) União das imagens da esquerda e da direita e equalização global do histograma da imagem resultante.
- f) Determinação da posição circunferencial da parede interna do tubo.
- g) Avaliação da espessura de filme na sonda de medição através da identificação da fronteira gás-líquido na imagem binarizada.
- h) Aplicação da calibração na espessura de filme.

#### 6.2.1. Definição da Posição e Largura da Sonda de Medição

Como já mencionado anteriormente, a sonda de medição é definida como sendo a região em uma dada imagem do escoamento onde se realiza a medição da espessura do filme líquido. A Figura 6.11 auxilia na definição da sonda na imagem transversal do escoamento.

Na Figura 6.11 pode-se observar a imagem transversal esquemática de uma onda de líquido no interior do tubo. 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. A sonda, de largura  $l_s$ , é indicada por um par de linhas verticais mais grossas ligando a parede inferior com a superior do tubo horizontal. A espessura do filme medida,  $h(t)$ , é avaliada como a média da altura de cada coluna de *pixels* que define a sonda de medição. A decisão se um dado *pixel* pertence ao líquido ou ao gás depende do método de binarização, como já descrito na Seção 5.2.4, para o caso de uma imagem longitudinal do escoamento.

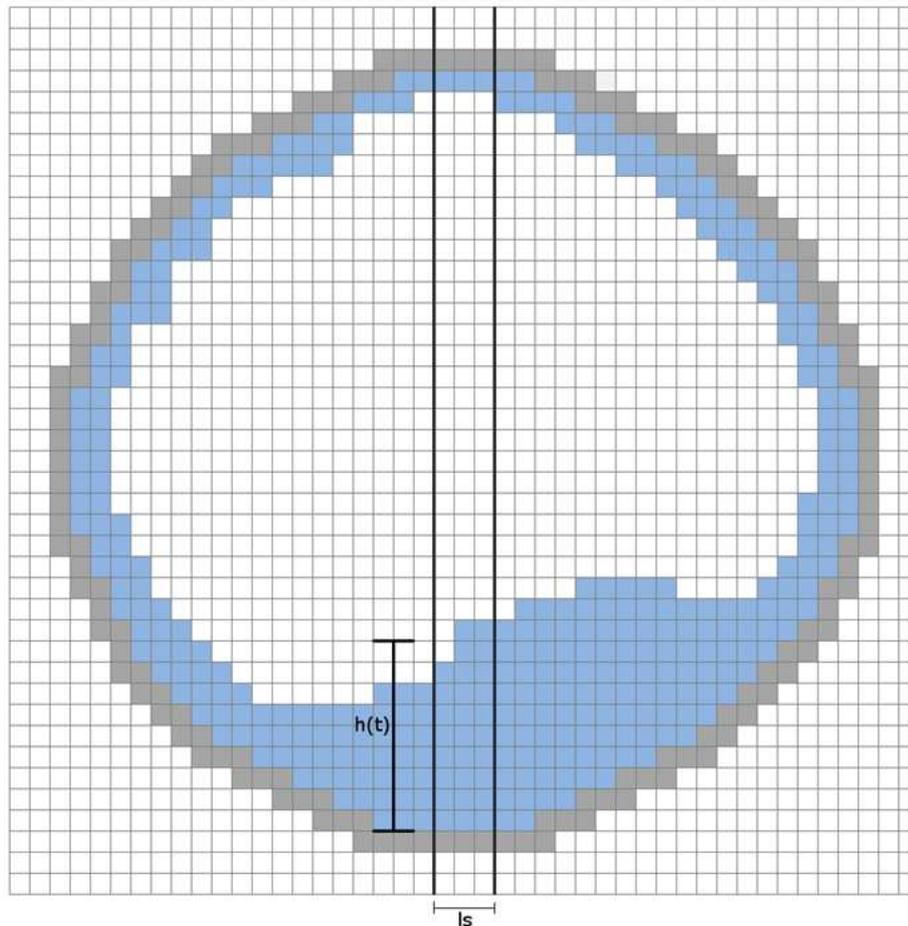


Figura 6.11 - Representação esquemática da sonda para medição da espessura do filme de líquido sobre imagem digitalizada.

### 6.2.2. Procedimento para Aumento do Contraste das Imagens

O pré-processamento aplicado nas imagens de filme líquido capturadas pelas câmeras da esquerda e da direita era iniciado através da aplicação de um procedimento de equalização de histograma global em ambas as imagens. Esta equalização ajustava automaticamente os extremos de luminosidade para a imagem como um todo de forma a distribuir igualmente os tons de cinza da imagem ao longo de toda a faixa dinâmica de “0” a “1” do sensor e amenizando possíveis discrepâncias de iluminação entre as câmeras. Isto era necessário uma vez que as duas imagens apresentavam diferentes distribuições de níveis de cinza em virtude de diferenças de iluminação.

### 6.2.3. Distorção das Imagens

Na Seção 6.1.2 foi descrito o procedimento adotado para obtenção do polinômio de calibração para distorção das imagens do alvo calibração. Estes polinômios, referentes ao alvo capturado pelas câmeras da esquerda e da direita, eram aplicados então em cada par de imagens que compunha a seção transversal do escoamento. A Figura 6.12 ilustra as imagens resultantes após o procedimento de distorção aplicado nas imagens da Figura 6.10.

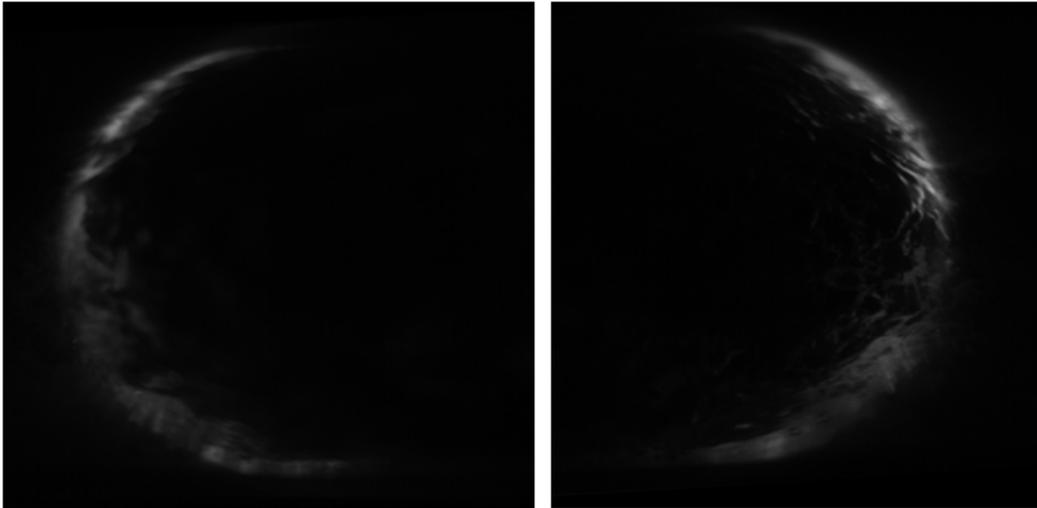


Figura 6.12 - Imagens instantâneas distorcidas do filme líquido obtidas pelas câmeras da esquerda e da direita.

### 6.2.4. União das Imagens

O par de imagens já distorcidas das câmeras da direita e esquerda era então unido seguindo os procedimentos descritos na Seção 6.1.4. Desta forma, a imagem transversal instantânea do filme de líquido era formada. A intensidade de cinza da imagem resultante era obtida pela média aritmética das intensidades de cinza das imagens da esquerda e da direita nas posições correspondentes.

Diferentemente do que foi adotado no procedimento para melhoria do contraste das imagens longitudinais na Seção 5.2.2, um procedimento de equalização de histograma global era aplicado também na imagem da seção transversal resultante. Um exemplo de imagem resultante após a distorção e união pode ser visto na Figura 6.13.

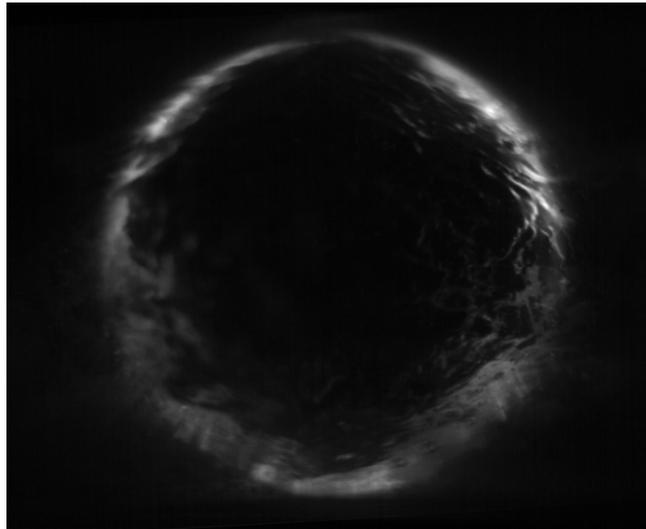


Figura 6.13 - Imagem instantânea típica do filme de líquido no escoamento anular horizontal após a distorção e união das imagens capturadas pela câmera da esquerda e da direita.

### 6.2.5. Aplicação da Máscara Externa

Após o processo de distorção e união das imagens da câmera da esquerda e da direita, a imagem instantânea da seção transversal estava completa. Porém, observava-se a existência de “fantasmas” externos ao tubo decorrentes de sinais de fluorescência de porções de filme de líquido em posições a montante da posição do plano de luz laser. Estas imagens espúrias eram removidas através da aplicação de uma máscara sobre todas as imagens. Esta máscara era construída a partir de imagens de tubo cheio de líquido capturadas pelas duas câmeras. Estas duas imagens eram distorcidas e unidas, conforme o procedimento já apresentado. A Figura 6.14 apresenta a seção transversal do tubo preenchido com a solução de água e rodamina reconstruída.

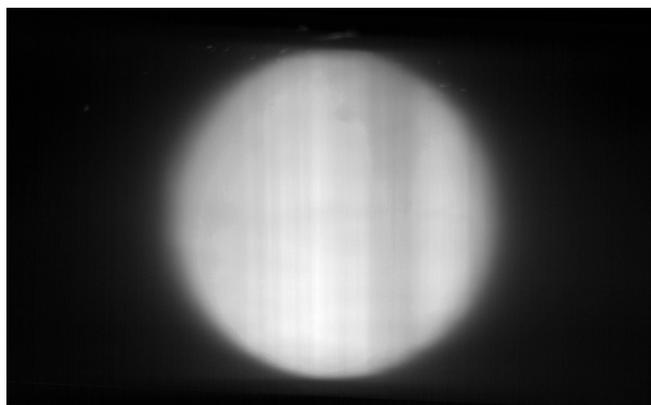


Figura 6.14 - Imagem do tubo cheio da solução de água e rodamina distorcida e unida.

A máscara ilustrada na Figura 6.15 foi criada a partir da imagem da Figura 6.14. Através da binarização desta imagem foi possível ajustar um círculo que melhor circunscrevesse os *pixels* de nível lógico “1”, ou seja, a região interna do tubo preenchida de líquido. Na máscara, a área branca corresponde à região de interesse – delimitada pela parede interna do tubo – e a preta, a região fora do tubo, que deve ser desconsiderada.

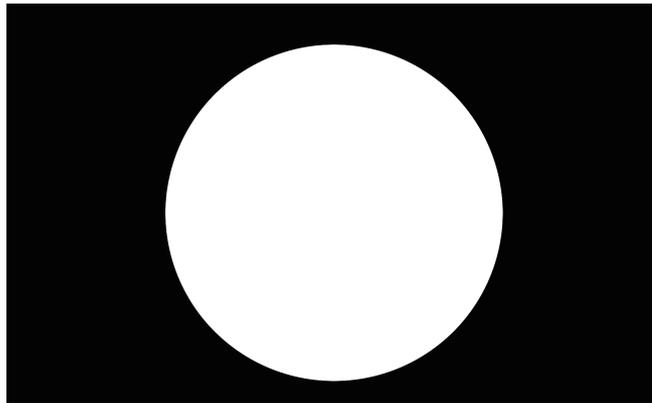


Figura 6.15 – Máscara criada a partir das imagens do tubo cheio.

Na Figura 6.16 é mostrada uma sequência de imagens típicas do filme de líquido após a aplicação da máscara. É possível perceber que apenas a região de interesse, a parte interna do tubo, foi mantida. Deve ser ressaltado que a aplicação da máscara é apenas uma operação cosmética, sem nenhum efeito na espessura do filme capturada dentro do tubo.

Recomenda-se ao leitor interessado acessar o Vídeo 3 em anexo à versão eletrônica da presente dissertação, disponível na biblioteca digital da PUC-Rio. As imagens apresentadas na Figura 6.16 foram retiradas deste vídeo, que fornece informações riquíssimas sobre a dinâmica do filme de líquido, informações ainda não disponíveis na literatura internacional.

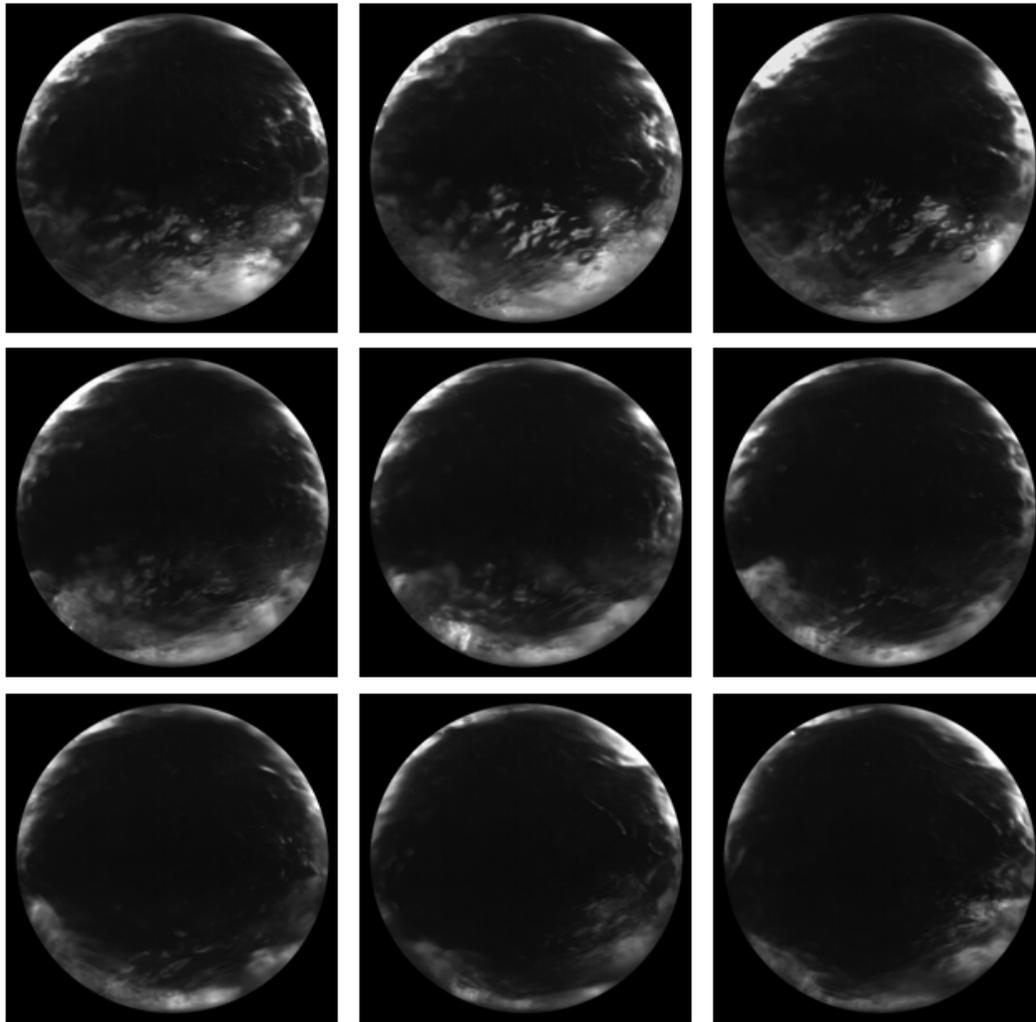


Figura 6.16 - Sequência de imagens instantâneas típicas do filme de líquido após a aplicação da máscara.

#### 6.2.6. Determinação da Espessura de Filme Líquido

A espessura de filme líquido era determinada na região da sonda nas imagens unidas após a aplicação da máscara como representado esquematicamente na Figura 6.11. Nesta região, primeiramente, o histograma era equalizado por coluna, de forma análoga ao caso longitudinal, apresentado na Seção 5.2.2. A sonda equalizada era então binarizada e a espessura de filme líquido extraída através da soma de *pixels* de valores lógicos “1”, seguindo o mesmo critério descrito na Seção 5.2.4. A contagem era iniciada a partir da posição interna do tubo, definida pela máscara.

Este procedimento era realizado para uma sonda fixa sempre localizada a zero graus como esquematizado na Figura 6.11. Portanto, as espessuras de filme líquido em outras posições circunferenciais foram obtidas aplicando-se uma

transformação de rotação na imagem e sempre medindo a espessura do filme na posição inferior.

### 6.3. Teste de Iluminação

Na visualização da seção transversal do tubo, foram realizados vários testes de iluminação para definir a posição de entrada do plano de laser na seção de testes. A iluminação deveria ser suficiente para fluorescer o filme líquido em toda a circunferência do tubo.

Inicialmente, o feixe incidia na caixa de visualização de baixo para cima. Essa configuração gerava imagens com uma boa iluminação do filme líquido inferior, mas não tinha energia suficiente para excitar o filme líquido em outras posições circunferenciais.

Para aumentar a fluorescência e conseguir visualizar o filme em outras posições circunferenciais, foram realizadas tentativas de iluminar o escoamento incidindo o feixe lateralmente à caixa de visualização, sem o uso de espelhos. Esta configuração embora tivesse um potencial de uniformizar a energia tanto na parte inferior e superior, quanto na lateral do tubo, permitiu apenas que metade da seção transversal fosse iluminada.

Finalmente, foi utilizada uma configuração em que o plano de laser era incidido pela face superior da caixa de visualização. Nesta montagem, todo o escoamento ficou bem iluminado, uma vez que o filme líquido superior, de menor espessura, recebia primeiramente a iluminação com a máxima energia. A energia do laser diminui quando atravessa caminhos ópticos de diferentes índices de refração. Ao passar pelo filme líquido superior e pelo núcleo de gás, a energia que excita o filme inferior é menor do que a incidente. Entretanto, o filme líquido inferior, por ter maior espessura, possui mais fluorescência e mesmo com menos energia no feixe, pode ser excitado. A montagem óptica está sendo modificada para produzir uma iluminação mais uniforme, que vai permitir uma melhor iluminação em toda a seção transversal do tubo. Uma alternativa ainda não testada foi a utilização de um divisor de feixe para iluminar tanto pela parte inferior quanto pela parte superior.

A Figura 6.17 ilustra imagens capturadas com (a) iluminação inferior, (b) lateral e (c) superior à caixa de visualização.

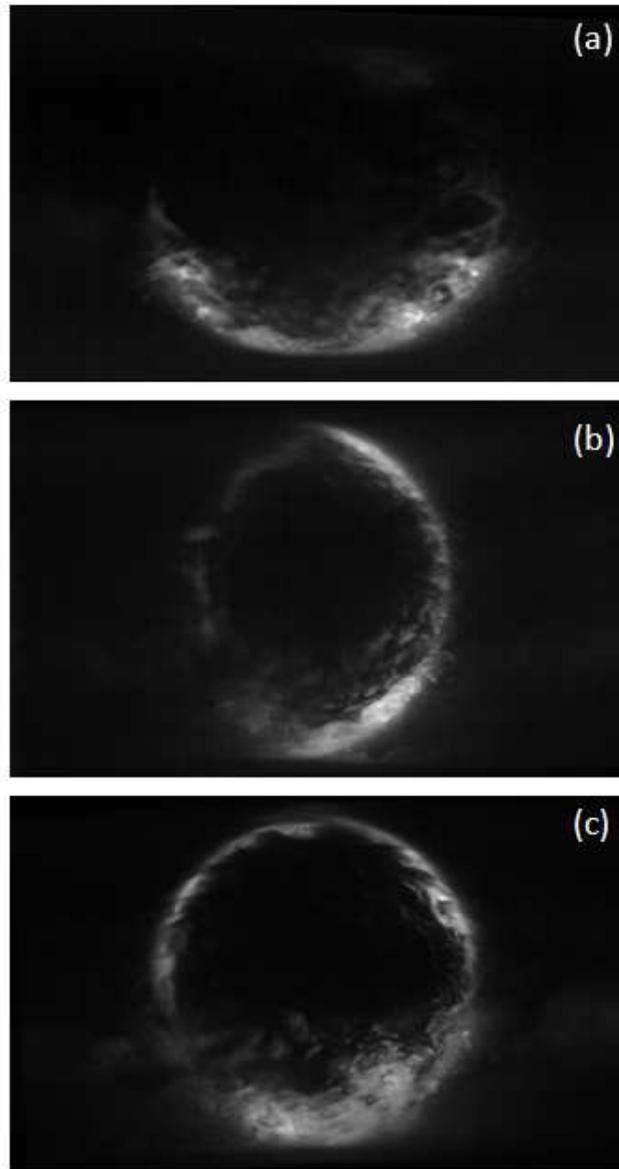


Figura 6.17 – Imagens obtidas com iluminação (a) inferior, (b) lateral e (c) superior