

3 Técnicas Ópticas de Visualização Utilizadas

As técnicas disponíveis para visualização de escoamentos desenvolveram-se significativamente nos últimos anos. A disponibilidade de lasers contínuos com elevada potência, e de lasers pulsados de alta energia e com taxas de repetição cada vez mais altas tem possibilitado a iluminação adequada para os escoamentos de interesse acadêmico e industrial. Aliado a isto, a evolução constante das câmeras digitais e da capacidade de processamento das imagens têm permitido a captura e análise de escoamentos cada vez mais complexos.

Algumas configurações, no entanto, apresentam complicadores que dificultam ou mesmo inviabilizam a utilização de técnicas de visualização. Dentre estas encontram-se os escoamentos com mais de uma fase, onde a variação do índice de refração dos fluidos em escoamento provoca o espalhamento da luz nas interfaces. A visualização de escoamentos bifásicos de ar e água em regime anular, em particular, apresenta a dificuldade adicional da existência do filme de líquido junto à parede, o que promove o espalhamento da luz incidente dificultando a visualização da interface interna ar-água.

Técnicas de medição baseadas na visualização quantitativa do escoamento são fontes riquíssimas de dados experimentais que podem ser usados para um melhor entendimento dos fenômenos físicos envolvidos. Essas técnicas têm sido amplamente aplicadas a escoamentos monofásicos, sendo aqui nosso principal objetivo estendê-las para aplicações em escoamentos bifásicos.

Esse trabalho tem como foco o estudo do escoamento anular em tubos horizontais. O objetivo da técnica desenvolvida é fornecer informações que permitam a completa caracterização estatística do filme de líquido através de, por exemplo, valores médios e *RMS* da espessura do filme, velocidade e espectro de frequência das ondas.

Neste capítulo serão descritas as técnicas ópticas e as montagens utilizadas para as visualizações transversais e longitudinais do escoamento do filme de líquido. No Capítulo 4 serão descritos os detalhes técnicos dos equipamentos utilizados e nos capítulos 5 e 6 os procedimentos para a condução dos experimentos serão apresentados.

3.1. Fluorescência Planar Induzida por Laser

Como já mencionado, a principal dificuldade na visualização de escoamentos bifásicos gás-líquido origina-se no intenso espalhamento da luz incidente nas interfaces. Uma solução para contornar este problema é a separação da luz espalhada na interface daquela emitida pelo líquido por meio de filtros ópticos. Isto pode ser obtido pela técnica de Fluorescência Planar Induzida por Laser (*Planar Laser Induced Fluorescence - PLIF*) que será descrita brevemente a seguir.

Algumas substâncias apresentam a propriedade de fluorescência que consiste na emissão de luz em comprimento de onda diferente do comprimento de onda da luz incidente. O fenômeno de fluorescência pode ser considerado como instantâneo para as aplicações em escoamentos de fluidos, uma vez que o tempo decorrido entre a excitação e a emissão é da ordem de 10^{-15} segundos. A Figura 3.1 apresenta um espectro de absorção e emissão da substância Rodamina quando excitada por luz verde com comprimento de onda centrado em 542 nm. Na figura, a ordenada representa a intensidade da luz incidente ou emitida, enquanto a abscissa indica o comprimento de onda. Como pode ser observado, há um deslocamento do pico de emissão em relação ao de excitação, conhecido como deslocamento de Stokes. A utilização de um filtro óptico com comprimento de onda de corte de cerca de 550 nm seria capaz de separar a luz incidente da emitida.

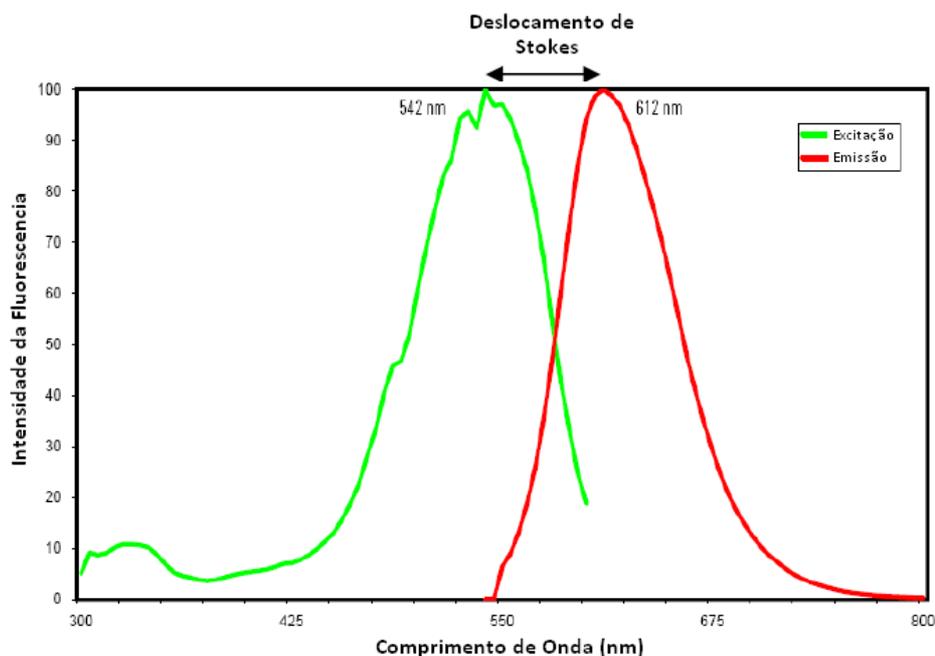


Figura 3.1 - Espectro de absorção e fluorescência (Fonte: Thermo Scientific).

A fluorescência induzida por laser foi utilizada no presente trabalho para possibilitar a visualização da interface ar-água no escoamento anular. A Figura 3.2 auxilia na descrição da montagem experimental utilizada. Este arranjo foi adaptado do trabalho de Rodriguez & Shedd (2004).

Na figura, um feixe laser na forma de um plano de luz de pequena espessura incide através da parede transparente do tubo contendo o escoamento anular a ser visualizado. O escoamento é formado por ar e água contendo uma substância fluorescente, *Rodamina 610*, no nosso caso. A passagem do plano laser pelo líquido induz a fluorescência da Rodamina. Uma câmera digital posicionada ortogonalmente ao plano de luz captura a luz emitida pela fluorescência. Para que a câmera não receba também a luz muito mais intensa, proveniente da fonte de laser espalhada nas interfaces ar-água, um filtro óptico passa-alta com comprimento de onda de corte por volta de 550 nm é posicionado na frente da lente da câmera. Deste modo, somente a luz emitida pela fluorescência no líquido é capturada produzindo uma imagem de qualidade do filme de líquido.

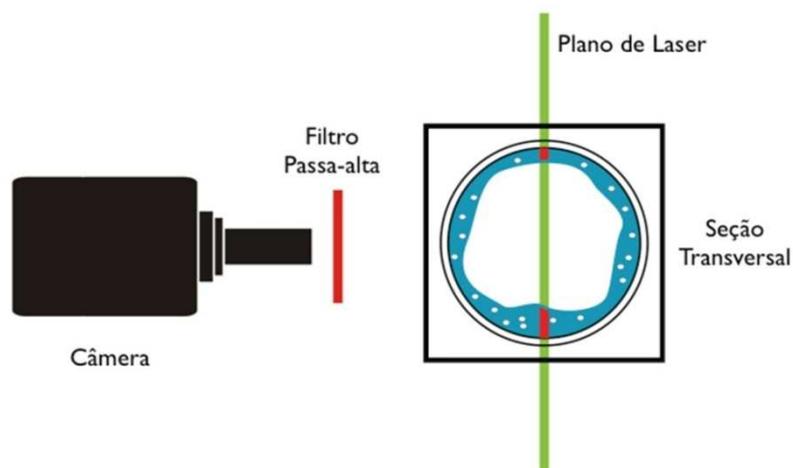


Figura 3.2 - Vista esquemática da técnica de visualização baseada na Fluorescência Induzida por Plano de Laser – *PLIF* aplicada a escoamento bifásico anular horizontal.

A Figura 3.3 apresenta um diagrama que auxilia na compreensão da técnica de visualização empregada. O laser pulsado de Nd:YLF utilizado nos experimentos emite luz com comprimento de onda de 527 nm que incide na mistura água-rodamina e também nas interfaces ar-água. A luz proveniente da seção de testes possui comprimentos de onda de 527 nm (espalhamento das interfaces) e 610 nm (fluorescência do líquido). Após passar pelo filtro óptico, apenas o comprimento de onda de 610 nm sobrevive e alcança a câmera digital

registrando a imagem do filme de líquido. Detalhes dos equipamentos utilizados para aplicação desta técnica serão descritos no Capítulo 4.

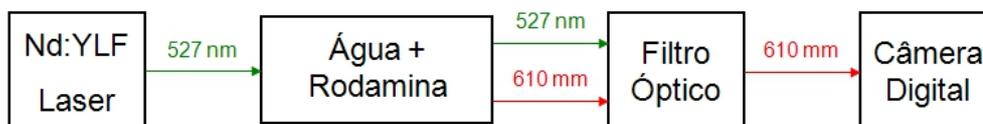


Figura 3.3 - Diagrama do princípio de funcionamento do sistema de visualização empregando a técnica *PLIF*.

3.2. Equalização do Índice de Refração

A utilização de técnicas ópticas de visualização qualitativa ou quantitativa de escoamentos confinados em dutos ou passagens delimitadas por paredes, enfrenta invariavelmente o problema de distorções ópticas. Estas distorções são introduzidas pela diferença de índices de refração entre o meio externo à seção de testes, o material da parede sólida e o fluido de trabalho no interior da seção de testes. Paredes com geometrias complexas, ou mesmo as simples paredes curvas de tubos, causam distorções que, muitas vezes, podem inviabilizar a interpretação dos resultados de um experimento de visualização, especialmente se este for destinado à obtenção de informações quantitativas do escoamento.

No caso particular do presente trabalho, o problema de distorções ópticas devido à variação de índices de refração torna-se relevante, pois o escoamento anular horizontal é caracterizado por espessuras de filme de líquido que variam de alguns poucos micrometros até alguns milímetros. Assim, a região de interesse para a medição do filme é exatamente a região muito próxima à parede do tubo onde as distorções ópticas devido à curvatura são mais relevantes.

O uso de materiais sólidos e fluidos com valores de índices de refração próximos é uma boa solução para possibilitar a visualização através de paredes curvas e superfícies livres. No entanto, encontrar um par de materiais adequados é uma tarefa difícil. Uma parte significativa de nosso esforço de pesquisa foi dedicada à busca de materiais sólidos e de fluidos de trabalho que minimizassem os efeitos de distorção e que fossem compatíveis com a técnica *PLIF* descrita anteriormente. Também, houve a preocupação de utilizar fluidos que não fossem tóxicos ou trouxessem outros perigos à saúde dos usuários do laboratório.

Dentre as várias possibilidades estudadas, duas alternativas foram selecionadas para resolver o problema decorrente da diferença de índices de refração entre o fluido de trabalho e o material da parede do tubo.

A primeira alternativa selecionada utilizou água como fluido de trabalho e tubo confeccionado com um material denominado *FEP*, *Fluorinated Ethylene Propylene*. Este material apresenta índice de refração muito próximo ao da água, tendo sido sua utilização primeiramente proposta para fins de visualização por Hewitt et al. (1990).

Na segunda alternativa considerada, utilizou-se tubo de acrílico e uma solução de água e iodeto de sódio que, em altas concentrações, apresenta índice de refração muito próximo ao do acrílico, como apresentado na Figura 3.4. Em ambas as soluções apresentadas, utilizou-se Rodamina 610 como a substância fluorescente misturada à água e a iluminação com um plano de luz laser verde, para permitir a visualização das interfaces líquido-gás através da técnica *PLIF*. A Figura 3.5 e a Figura 3.6 apresentam as imagens capturadas utilizando-se as duas configurações. Essas imagens foram comparadas para definir a opção em que se observa a melhor visualização da interface do filme base, característico do escoamento anular.

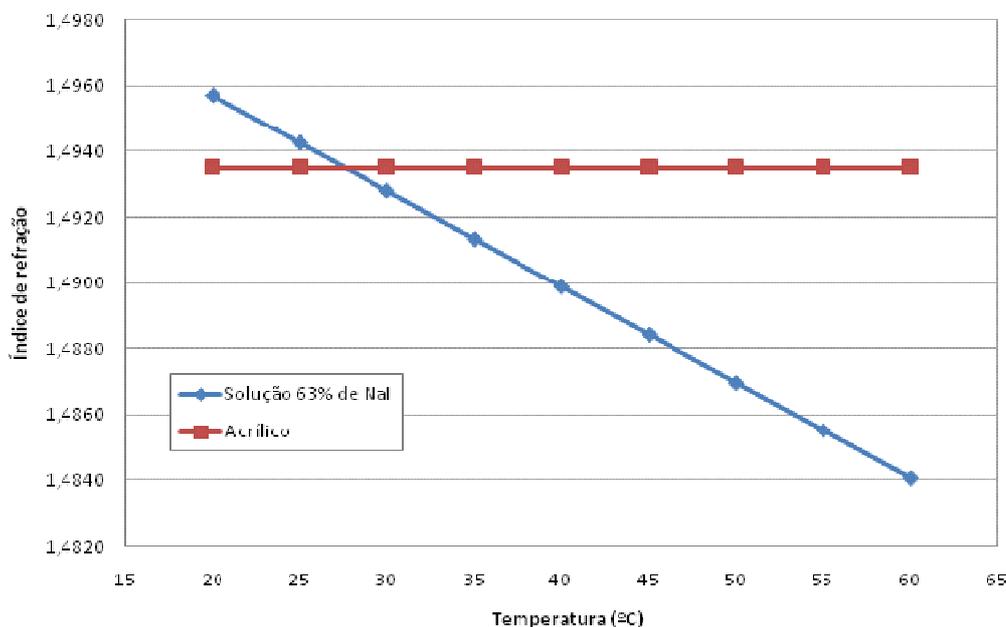


Figura 3.4 - Comparação entre o índice de refração do acrílico e da solução salina de iodeto de sódio.

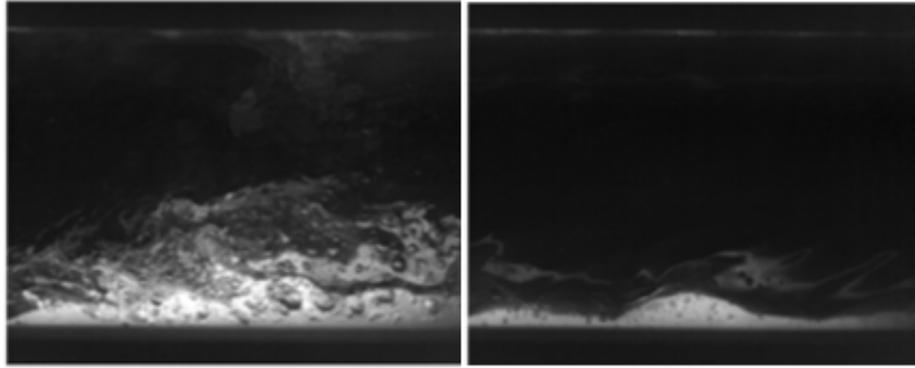


Figura 3.5 - Imagens do escoamento do filme de líquido inferior em escoamento anular obtidas com água com Rodamina 610 escoando em tubulação fabricada em *FEP*.

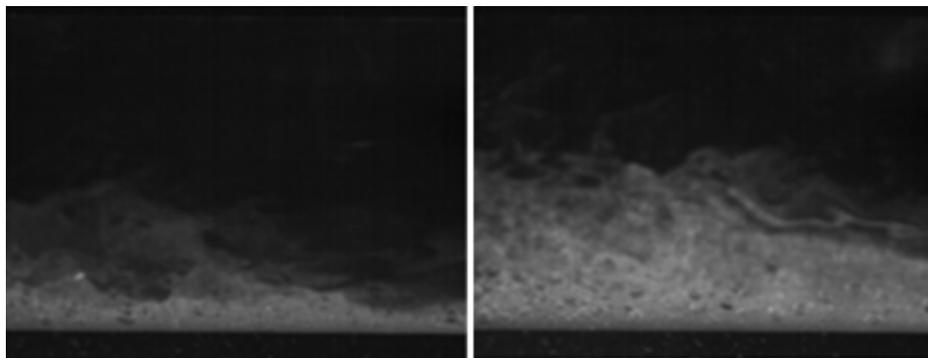


Figura 3.6 - Imagens do escoamento do filme de líquido inferior em escoamento anular obtidas com solução salina de água e iodeto de sódio com Rodamina 610 escoando em tubulação fabricada em acrílico.

Analisando as figuras acima podemos observar que a utilização da opção com o tubo de *FEP* produziu imagens que apresentaram melhor contraste entre o líquido e o gás, melhor delineamento da interface e definição das bolhas e ondas. As imagens com a solução salina apresentaram um contraste inferior entre as fases. Além disto, a preparação da mistura é bastante trabalhosa, degrada quando exposta a luz ou oxigênio, e possui densidade muito elevada na concentração de 63% em massa de iodeto de sódio. Talvez esta solução seja interessante para seções de testes com geometrias complexas onde há maior facilidade na fabricação de peças em acrílico ou para visualização de escoamentos monofásicos.

Outro fator que dificulta a utilização da solução salina diz respeito à evaporação da água e conseqüente aumento da concentração de sal quando se utiliza um circuito de ar aberto para atmosfera. Neste arranjo, adotado em nossos experimentos, como será descrito no Capítulo 4, o ar proveniente do compressor, após circular pela seção de testes é direcionado para fora do

laboratório, enquanto a água é recirculada em um circuito fechado. A alternativa para este problema seria operar com o ar também em circuito fechado, o que obrigaria a instalação de trocadores de calor para manter a temperatura da solução estável.

Com o intuito de ilustrar o efeito obtido com o ajuste do índice de refração entre a parede do tubo e o fluido e trabalho, são apresentadas a seguir algumas figuras resultantes de testes realizados com tubos de vidro e de *FEP* imersos em água. Um papel milimetrado foi colocado como fundo nas imagens para permitir a avaliação das distorções ópticas. Na Figura 3.7(a), as imagens são de um trecho de tubo de *FEP* preenchido com água e colocado na posição vertical dentro da caixa de visualização cheia de água. Pode-se constatar na figura que não há distorções perceptíveis no papel milimetrado ao fundo. Note-se que mesmo nas regiões muito próximas à parede do tubo, onde há atenuação da luz, não há distorções. A Figura 3.7(b) mostra um tubo de vidro imerso em uma caixa, ambos preenchidos com água. Esta figura serve para ilustrar como distorções bastante significativas ocorrem quando o índice de refração do material não é próximo ao do fluido, como no caso do vidro em água.

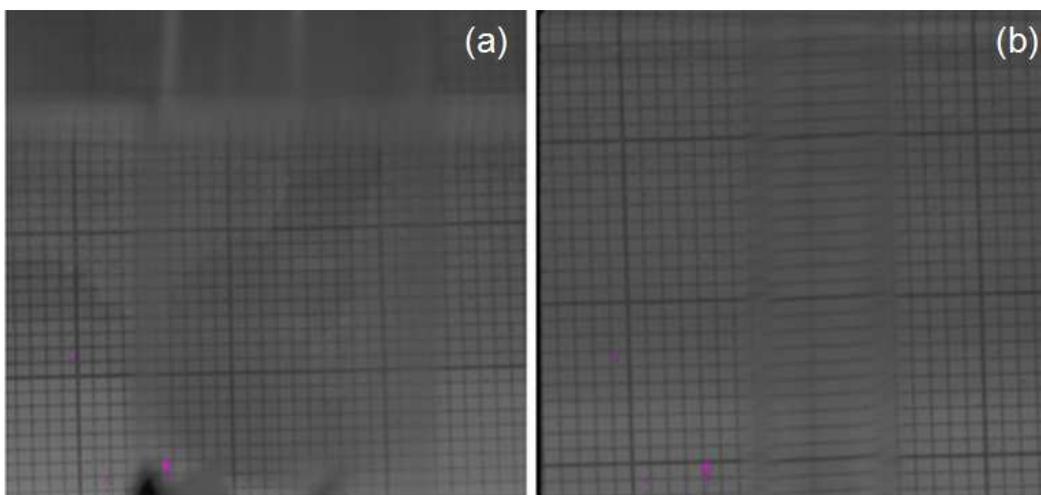


Figura 3.7 - Teste de distorção de imagem utilizando (a) tubulação de *FEP* com água e (b) tubulação de vidro com água.

Diante das observações expostas, pode-se concluir que a alternativa utilizando a tubulação de *FEP* apresentou melhores resultados nos testes de definição de interface na imagem e de distorção. Portanto, esta foi a opção escolhida para contornar o problema de diferença de índice de refração na captura das imagens nos experimentos, eliminando os efeitos de curvatura, e obtendo imagens livres de distorção.

Para atingir o objetivo do presente estudo de investigar o escoamento anular horizontal e desenvolver técnicas de medição e visualização aplicadas a esta geometria de escoamento, projetaram-se duas seções de testes com tubos de *FEP*. A primeira foi montada com um tubo de 15,8 mm de diâmetro interno e espessura de parede de 0,8 mm, e a segunda, com tubos de 50,8 mm de diâmetro e espessura 1,6 mm. Para garantir a formação do escoamento anular foi utilizada uma seção de testes de 4,5 m de comprimento para a seção com menor diâmetro e de 11 m para a de maior diâmetro.

3.3. Montagem Óptica

Como já mencionado, o objetivo do presente trabalho é caracterizar o comportamento dinâmico do filme de líquido em escoamento anular horizontal através de medidas quantitativas, produzindo também visualizações do escoamento. Por se tratar de uma configuração com alto grau de complexidade, optou-se por testar as técnicas de medição e visualização em experimentos com escala reduzida, avaliando-se a viabilidade de sua utilização em escalas maiores. Também, devido à complexidade da configuração, os estudos foram iniciados com medições ópticas instantâneas do filme de líquido através de cortes longitudinais do filme na parte inferior do tubo. Em seguida, desenvolveu-se uma técnica mais complexa que permitia a visualização e medição instantâneas da distribuição do filme ao redor da seção transversal do tubo.

Nas próximas seções será apresentada uma visão geral dos arranjos ópticos utilizados na implementação das duas técnicas de visualização desenvolvidas. Detalhes técnicos dos equipamentos utilizados serão apresentados no Capítulo 4, e o procedimento para a captura das imagens longitudinais e transversais serão relatados mais detalhadamente nos Capítulos 5 e 6, respectivamente.

3.3.1. Visualização Longitudinal Instantânea do Filme de Líquido

A Figura 3.8 auxilia na descrição dos ensaios realizados empregando visualizações longitudinais do filme de líquido. Nesta figura, o escoamento bifásico anular horizontal é representado esquematicamente. Pode-se observar o filme de líquido distribuído não uniformemente ao redor da parede do tubo

devido ao efeito da gravidade e gotículas de líquido arrancadas pelo escoamento de gás.

Na figura é indicada a região de interesse, localizada no plano central do tubo, em sua geratriz inferior. Uma imagem real típica obtida utilizando-se a técnica de fluorescência, capturada durante os ensaios realizados, é apresentada na figura, onde pode-se ter uma melhor idéia da configuração instantânea do filme de líquido. As manchas brancas sobre o filme líquido, mas não conectadas a ele, são imagens de líquido fora do plano e não devem ser interpretadas como fazendo parte do filme de líquido inferior. Para referência, a espessura média do filme na imagem apresentada é de cerca de 0,6 mm.

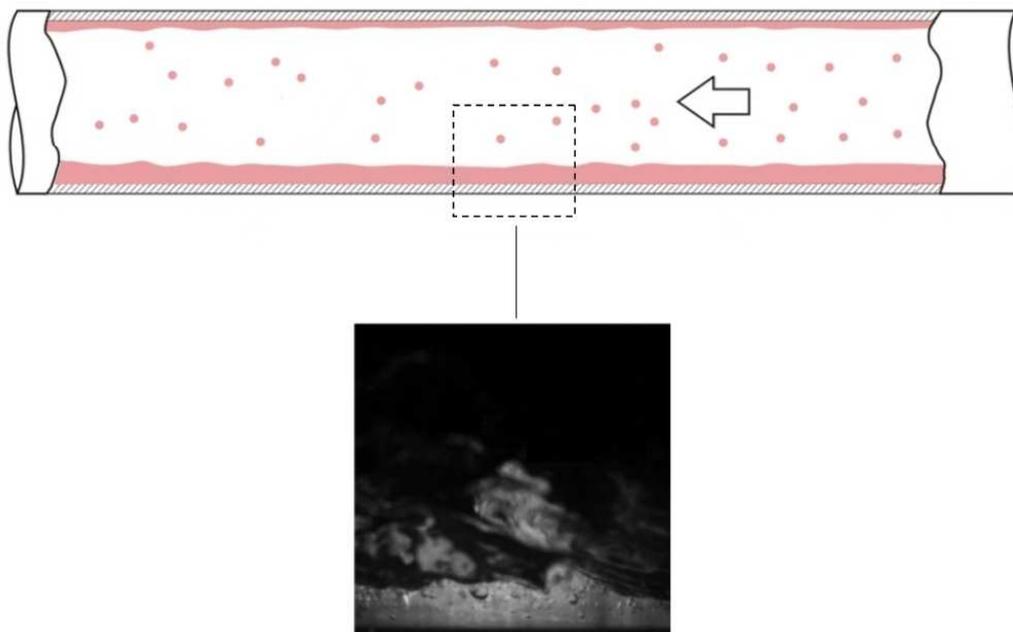


Figura 3.8 - Imagem típica capturada pela técnica de visualização longitudinal implementada.

Para obtenção de imagens do filme de líquido como a apresentada na Figura 3.8, é necessária uma fonte de luz pulsada de alta energia e frequência de pulsos, sincronizada a uma câmera de alta frequência de captura de quadros. A alta energia é necessária, pois o sinal de fluorescência do líquido é de baixa intensidade. A combinação de alta frequência de pulsação e captura de imagens é necessária devido às frequências características da dinâmica do filme de líquido que se deseja capturar.

Para atender às exigências mencionadas no parágrafo anterior, foi utilizado um laser Nd-YLF de dupla cavidade. O feixe de laser de seção reta circular emitido pelo sistema era transformado em um plano de luz de pequena

espessura utilizando-se uma lente cilíndrica seguida de uma lente esférica. A lente cilíndrica transformava o feixe em um plano divergente, enquanto a lente esférica controlava a espessura do feixe.

A Figura 3.9 apresenta uma vista esquemática da montagem utilizada na visualização transversal do filme de líquido. O plano de luz proveniente do laser incidia sobre um espelho montado a 45° , penetrando na seção de testes de baixo para cima, como indicado. Um caixa de visualização de vidro preenchida com água foi montada ao redor do tubo de *FEP* por onde passava o escoamento anular a ser medido. Esta caixa de visualização de paredes planas ajudava a minimizar os efeitos de distorção óptica já comentados. A câmera digital foi montada em uma mesa de coordenada tri-axial fixada à uma bancada rígida, com o eixo de sua lente posicionado ortogonalmente ao plano de iluminação. O filtro óptico necessário para o funcionamento da técnica *PLIF* foi montado à frente da lente da câmera.

Durante os experimentos, sequências de milhares de imagens como aquela mostrada na Figura 3.8 eram adquiridas a taxas de amostragem que variavam de 250 a 3000 Hz, dependendo do tipo de medição que estivesse sendo realizada. Em seguida, as imagens armazenadas eram processadas por algoritmos especialmente desenvolvidos para extrair informações estatísticas sobre o comportamento dinâmico do filme de líquido. Estas informações incluíam a variação temporal da espessura do filme de líquido em uma dada posição no tubo, a espessura média e seu valor *RMS* (medida da intensidade das flutuações da espessura de filme), o espectro de frequências e velocidade de propagação das ondas no filme. Além destas informações quantitativas, estavam disponíveis para análise as imagens que foram armazenadas e analisadas, o que auxilia na interpretação dos fenômenos físicos envolvidos no escoamento.

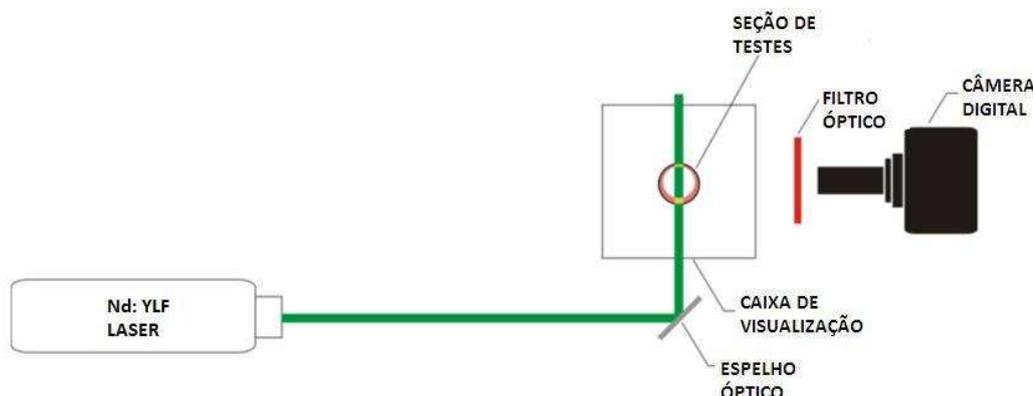


Figura 3.9 - Vista esquemática frontal da montagem óptica utilizada para a visualização e medição longitudinal do filme de líquido.

3.3.2. Visualização Transversal Instantânea do Filme de Líquido

Imagens instantâneas da seção transversal do filme de líquido ao longo da parede interna do tubo foram obtidas com a montagem transversal estereoscópica implementada. Neste caso, o plano de luz foi girado de noventa graus iluminando uma seção transversal do escoamento. A Figura 3.10 apresenta uma imagem típica obtida em um dos ensaios conduzidos onde a distribuição não uniforme do filme ao longo do perímetro do tubo pode ser claramente identificada. Esta imagem é o resultado de um processo complexo de processamento de imagens obtidas por duas câmeras digitais posicionadas externamente ao tubo em uma montagem estereoscópica, formando um ângulo de aproximadamente 45° entre si.

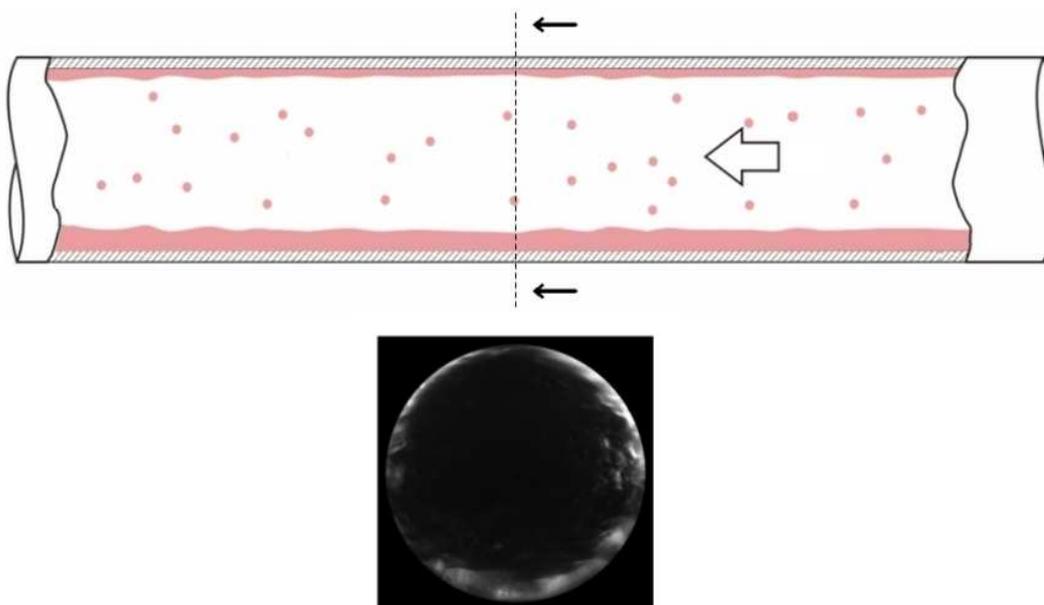


Figura 3.10 - Imagem típica capturada pela técnica de visualização transversal implementada.

A montagem experimental desenvolvida para a obtenção destas imagens é apresentada de maneira esquemática em uma vista superior na Figura 3.11. O plano de luz laser produzido com o mesmo arranjo de lentes, já descrito anteriormente para a técnica de visualização longitudinal, era utilizado para iluminar uma seção transversal completa do tubo. O plano de luz atravessava a caixa de visualização preenchida com água que tinha duas de suas paredes montadas em ângulo. Ortogonalmente a cada uma destas paredes inclinadas era posicionada uma câmera digital de alta taxa de aquisição de imagens. Cada

câmera observava em ângulo a seção reta do tubo iluminada pelo plano de luz laser. No entanto, com o escoamento em operação no regime anular, o filme de líquido em cada parede impede que uma dada câmera observe a parede oposta à sua posição. Desta forma, cada câmera limitou-se a capturar metade da seção reta do filme, ou seja, a câmera da direita observava a metade direita, enquanto a câmera esquerda, a metade esquerda. Estas imagens eram posteriormente juntadas por um processo automático de processamento de imagens produzindo a imagem instantânea da seção transversal do filme de líquido. Também nos experimentos de visualização transversal, foi utilizada a técnica *PLIF*, justificando a presença dos filtros ópticos representados na Figura 3.11.

A observação da seção reta do filme por câmeras montadas em ângulo produz imagens distorcidas que precisam ser corrigidas. Para isso foi desenvolvido um procedimento de calibração onde um alvo contendo uma matriz de pontos com espaçamento conhecido era introduzido no tubo. Imagens deste alvo eram obtidas pelas duas câmeras montadas em ângulo e alimentadas para um programa computacional desenvolvido. Este programa determinava dois polinômios interpoladores que, uma vez aplicados às imagens da esquerda e da direita, as distorciam recuperando sua forma original. Estes polinômios, obtidos na etapa de calibração, eram posteriormente aplicados em todas as imagens do escoamento, obtidas com as câmeras esquerda e direita. Estas imagens eram depois unidas reconstruindo a imagem da seção transversal do escoamento, como aquela apresentada na Figura 3.10. Os procedimentos de captura, calibração e processamento das imagens serão descritos de forma detalhada no Capítulo 6.

Assim como mencionado para o caso da visualização longitudinal, sequências de milhares destas imagens eram capturadas, armazenadas e analisadas produzindo as informações estatísticas sobre o comportamento dinâmico do filme. Nesta técnica, porém, de uma só vez, toda a distribuição circunferencial do filme está disponível para análise. Isto produz dados que, até o momento de preparação deste texto, ainda não haviam sido disponibilizados na literatura, o que confere um caráter de originalidade ao presente trabalho.

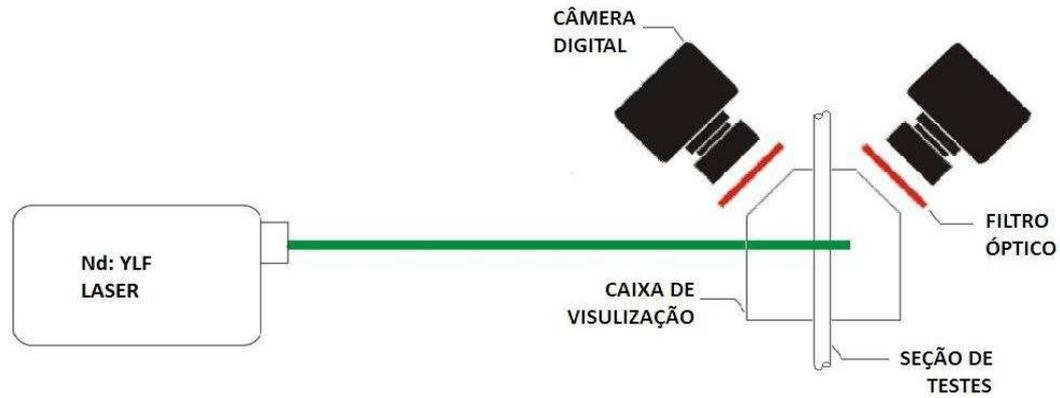


Figura 3.11 - Vista esquemática superior da montagem óptica estereoscópica utilizada para a visualização e medição da seção transversal do filme de líquido.