

# CARACTERIZAÇÃO INSTANTÂNEA DO FILME LÍQUIDO EM ESCOAMENTO ANULAR AR-ÁGUA HORIZONTAL, EMPREGANDO TÉCNICAS ÓPTICAS ESTEREOSCÓPICAS DE ALTA FREQUÊNCIA

Aluno: Carlos Eduardo Rodrigues

Orientador: Luiz Fernando Alzguir Azevedo

## Introdução

O escoamento multifásico está presente em diversas áreas da indústria, como na de geração de energia elétrica, na área nuclear e, principalmente, na indústria do petróleo, onde é encontrado nas instalações de produção, transporte e processamento de hidrocarbonetos.

O escoamento bifásico ar-água em tubos horizontais pode apresentar vários padrões de escoamento, dependendo das vazões de ar e água [3]. Os padrões mais comuns são ilustrados na Figura 1.

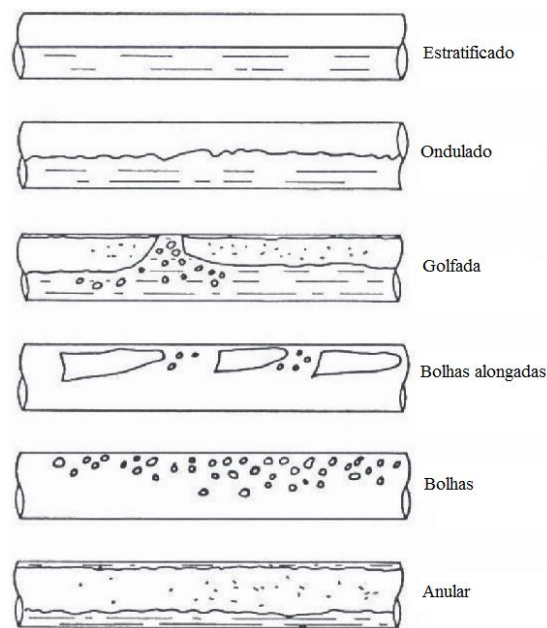


Figura 1– Representação dos padrões de escoamento.

O padrão estudado foi o anular, o qual é caracterizado por ocorrer em velocidades de gás elevadas, onde a fase gasosa concentra-se na parte central do tubo, enquanto a fase líquida escoava em forma de um fino filme na parede interna do duto. A interface entre o filme líquido e a região central de gás é turbulenta, e há entramento de bolhas de ar no filme líquido. Altas vazões de gás causam a dispersão de gotículas de líquido na fase gasosa. Dependendo das vazões de gás e líquido e da gravidade, a espessura do filme ao redor do tubo varia. Quando a razão entre a vazão do gás e do líquido é baixa, a espessura de filme na base do tubo é muito maior do que em outras posições circunferenciais, enquanto as ondas estáveis cobrem a superfície restante, eventualmente molhando a parte superior.

## Experimento

Foi construída uma estrutura com perfis de alumínio Bosch, o que garantiu uma seção de testes nivelada e com acoplamento das partes e sendo de fácil alteração. A Figura 2 apresenta uma visão de toda a seção. As setas azuis e verdes indicam o sentido do escoamento de líquido e gás, respectivamente.

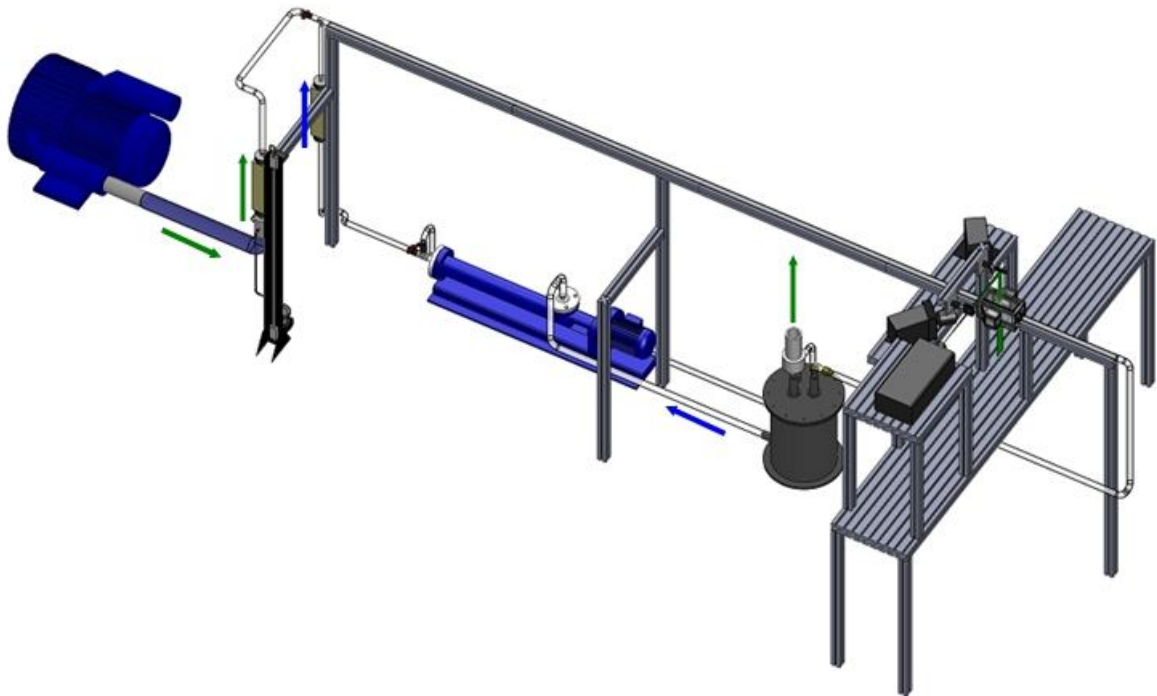


Figura 2 – Visão geral da seção de testes

Um compressor radial controlado por um inversor de frequência provém a seção de ar enquanto a água é bombeada por uma bomba de cavidade progressiva. Tanto o ar quanto a água passam por rotômetros para medição da vazão antes da entrada da tubulação horizontal, onde se dá o início do desenvolvimento do escoamento.

O experimento empregou um tubo de diâmetro interno de 15,8 mm fabricado de FEP, *Fluorinated Ethylene Propylene*, que possui índice de refração próximo ao da água, minimizando distorções ópticas, permitindo a visualização do filme líquido nas regiões perto do tubo (Hewitt *et al.*, 1990). Por causa da falta de rigidez do tubo, este foi revestido com um tubo de PVC transparente com diâmetro interno perto do diâmetro externo do tubo FEP, viabilizando a centralização, fixação e o alinhamento da seção de testes na bancada experimental. Este revestimento só não foi utilizado na região de visualização.

A entrada de água e ar no tubo de FEP ocorre através de um misturador em forma de “T”. Os dois fluidos escoam por todo o tubo, de comprimento de 4,0 m, desenvolvendo o padrão de escoamento anular. A caixa de visualização está localizada a 0,5m antes do fim da tubulação.

Depois de percorrer a tubulação, a mistura vai para um tanque de separação. A água é reconduzida de volta ao circuito para ser reaproveitada e o ar é eliminado para fora do laboratório, a fim de evitar seu aquecimento.

Foi necessário colocar um sistema de válvulas na saída da bomba, para encaminhar parte da água de volta ao reservatório, já que a bomba oscilava nas vazões mais baixas de água. Assim era possível aplicar rotações mais elevadas na bomba, garantindo o funcionamento contínuo mesmo para baixas vazões de líquido.

A separação entre ar e água foi realizada através de um tanque de aço inox com capacidade máxima de 50 litros, que possuía uma entrada e duas saídas, conectado no final da seção de testes por uma mangueira, como pode ser visto na Figura 3.

A mistura de ar e água entrava pela parte superior do tanque e era conduzida para o fundo deste por um tubo em forma de “L”. Este tanque possui uma placa de separação no seu interior, que impede a saída da água pela abertura de ar superior na forma de gotículas. A água depositava-se então no fundo do tanque, e depois era conduzida para a bomba. O ar era eliminado para fora do laboratório, por uma mangueira conectada à abertura na parte superior do tanque.

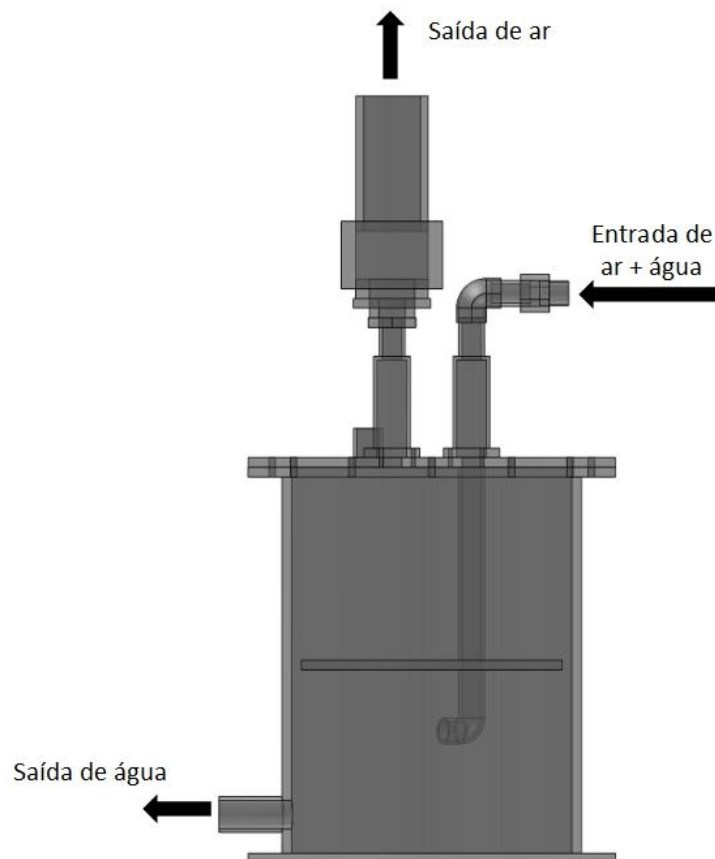


Figura 3 - Vista do tanque com destaque para a placa separadora em seu interior.

### Sistema de visualização

A técnica *Planar Laser Induced Fluorescence* – PLIF – foi utilizada para visualização dos escoamentos e para definição de suas formas e regimes. Essa técnica necessita que a região de visualização seja iluminada por um plano de luz monocromática, e se baseia no princípio de fluorescência [2].

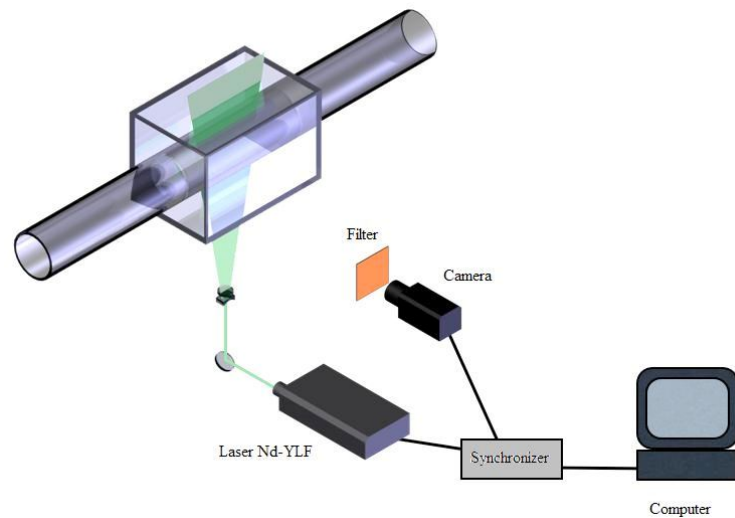


Figura 4– Esquema da montagem óptica para aplicação da técnica PLIF.

Um dos maiores problemas da aplicação desta técnica para escoamentos multifásicos é a diferença dos índices de refração dos fluidos. Para minimizar este problema, foi usado o tubo de FEP e água como fluido, como já comentado anteriormente.

O sistema de iluminação para essa técnica foi um laser pulsado de dupla cavidade e alta frequência, por ter alta densidade de energia e a capacidade de emitir luz monocromática. A função é fornecer ao escoamento um feixe plano de luz, com espessura, duração e intensidade bem definidos. A espessura do feixe de luz deve ser pequena para restringir-se à região do escoamento estudada, impedindo que regiões fora da profundidade de foco da câmera sejam iluminadas. Este feixe de laser, depois de refletido pelo espelho, ilumina a tubulação. Porém, devido à região de interesse ser um corte transversal do escoamento, o feixe incidente deve ser perpendicular ao eixo da seção de testes.

O laser e a câmera utilizados foram sincronizados por um sincronizador da TSI programado pelo *software* Insight 3G<sup>®</sup>, garantindo que os disparos do laser ocorressem durante o tempo de abertura da lente das câmeras.

Para que a formação das imagens é necessário que o fluido com uma substância fluorescente seja excitado com luz e assim parte dos raios espalhados sensibilizem o sensor eletrônico. A substância fluorescente usada foi Rodamina, a uma concentração de 500 µg/l, que ao ser iluminada pela luz verde do laser, com comprimento de onda de 527 nm, é excitada, emitindo luz em um comprimento de onda superior, 610 nm. A densidade e viscosidade da água não se modificaram com a adição do corante.

Para evitar a presença de luz verde (527nm) refletida, mas permitir a vermelha (610nm) é necessária a utilização de um filtro passa-alta. Este bloqueia a iluminação proveniente da reflexão, o que causaria problemas de visualização nas imagens do escoamento, deixando passar somente o comprimento de onda relativo à fluorescência. O filtro utilizado é caracterizado por permitir a passagem de comprimentos de onda maiores que 550 nm.

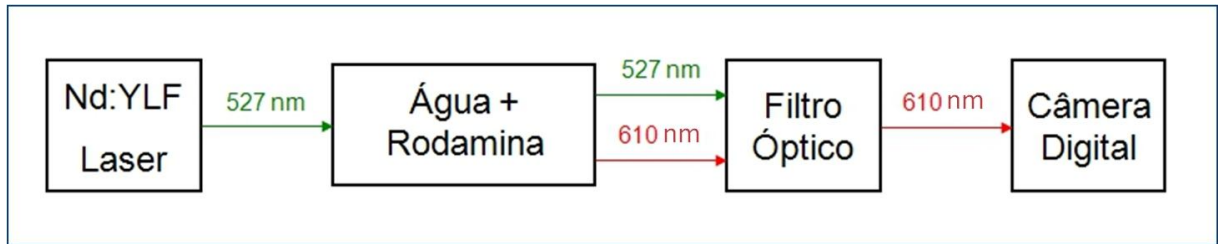


Figura 5 - Esquema de iluminação da seção

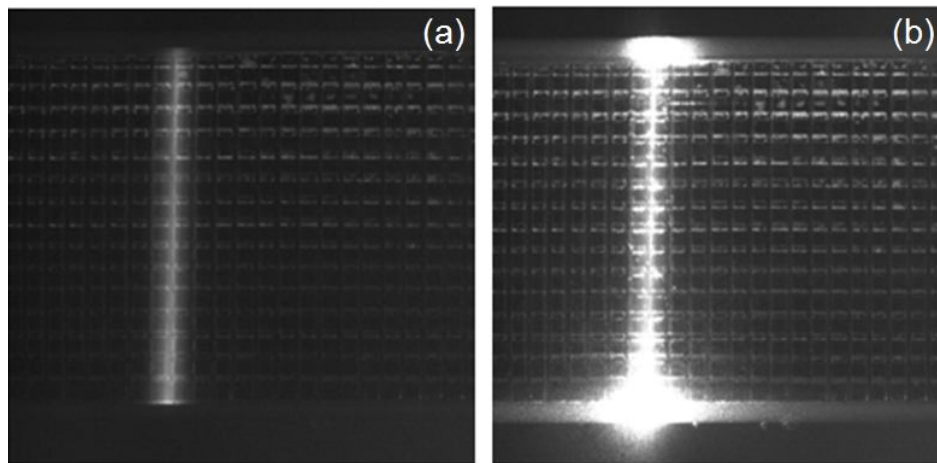


Figura 6–Imagens do alvo de calibração (a) com filtro óptico passa alta e (b) sem filtro

Para ilustrar a importância do filtro passa-alta, a Figura 6 mostra duas imagens de um alvo de calibração obtidas pelas câmeras, a primeira com filtro passa-alta e a segunda sem. Na primeira, apenas a fluorescência desejada é capturada. Na segunda, os reflexos de luz verde, mais intensos, são capturados pela câmera, prejudicando a visualização do escoamento.

Para a visualização transversal, duas câmeras foram posicionadas a  $45^\circ$  em relação à seção de teste, observando o escoamento em ângulo. Objetivou-se com isso simular uma câmera posicionada no eixo do tubo visualizando o escoamento frontalmente.

Lentes com diferentes distâncias focais e ampliações foram utilizadas nas medições de espessura de filme e velocidade. Cada lente possui uma ampliação e uma distância focal características.

Uma caixa de visualização foi montada, na região de visualização, ao redor do tubo de FEP, para minimizar a interferência do índice de refração dos diferentes materiais utilizados. Esta possui as faces de visualização paralelas às lentes das câmeras, reduzindo assim as distorções ópticas.

A Figura 7 apresenta o desenho da caixa de visualização montada em acrílico, com exceção das partes inferior e superior que possuíam janelas de vidro.

Para reduzir distorções ópticas suas faces estão dispostas de modo que estejam paralelas com a lente da câmera para cada uma das configurações. As câmeras devem estar dispostas de forma estereoscópica, com um ângulo de  $45^\circ$  em relação ao eixo do tubo. A visualização foi feita a uma distância de 220 diâmetros da entrada do tubo.

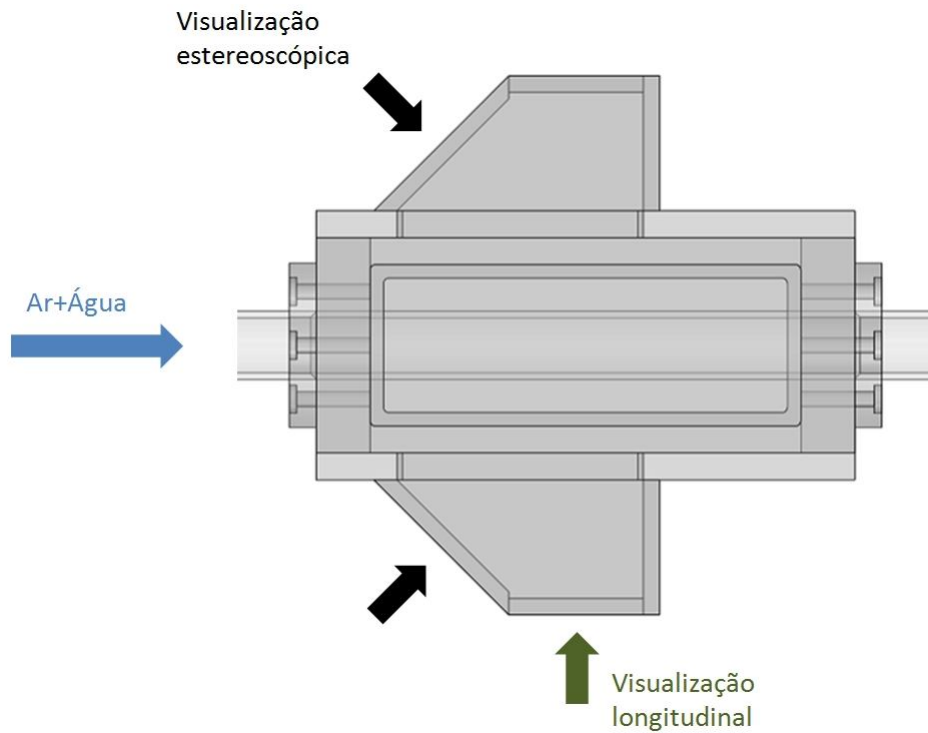


Figura 7 – Caixa de visualização com faces para visualização longitudinal e transversal

### Processamento de Imagens

Foi construído um alvo, a partir de um cilindro de latão com comprimento de 1 m. Uma grade padrão de pontos espaçados por 1,5 mm foi usinada na face do alvo, apresentado na Figura 8. A região escura foi anodizada, enquanto os pontos, com diâmetro de 0,5 mm, foram depois pintados de branco para fazer contraste. Para a realização do processo de calibração, o alvo foi inserido no tubo de teste e teve a sua face alinhada com o plano de laser.

A Figura 9 mostra um desenho do alvo de calibração inserido no tubo de FEP e visto através da janela da caixa de visualização, através da qual a câmera focaliza a imagem.

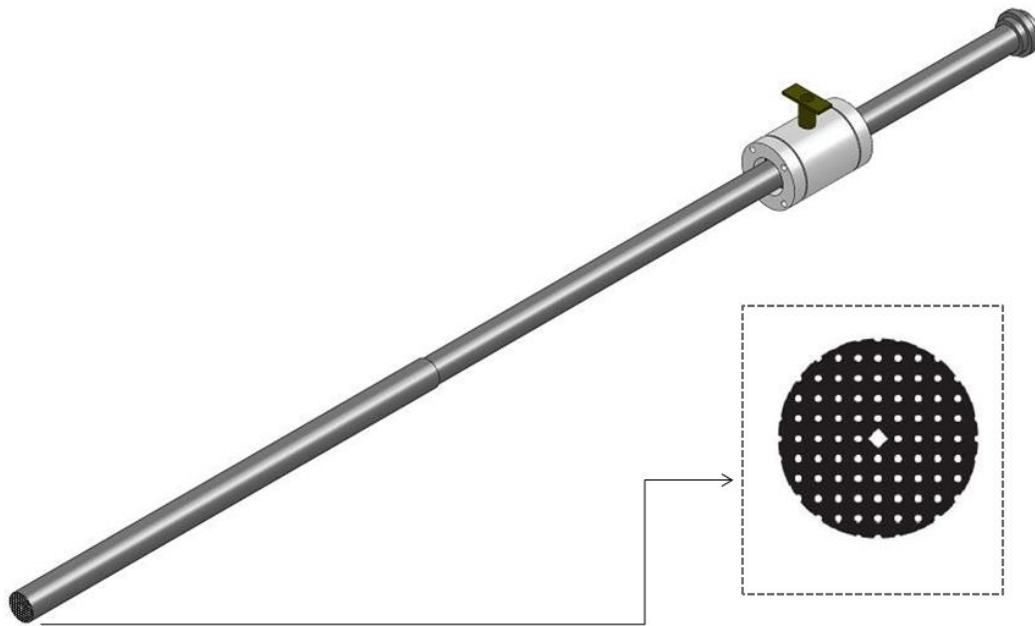


Figura 8– Alvo para calibração de imagens estereoscópicas com destaque para a grade de pontos usinada.

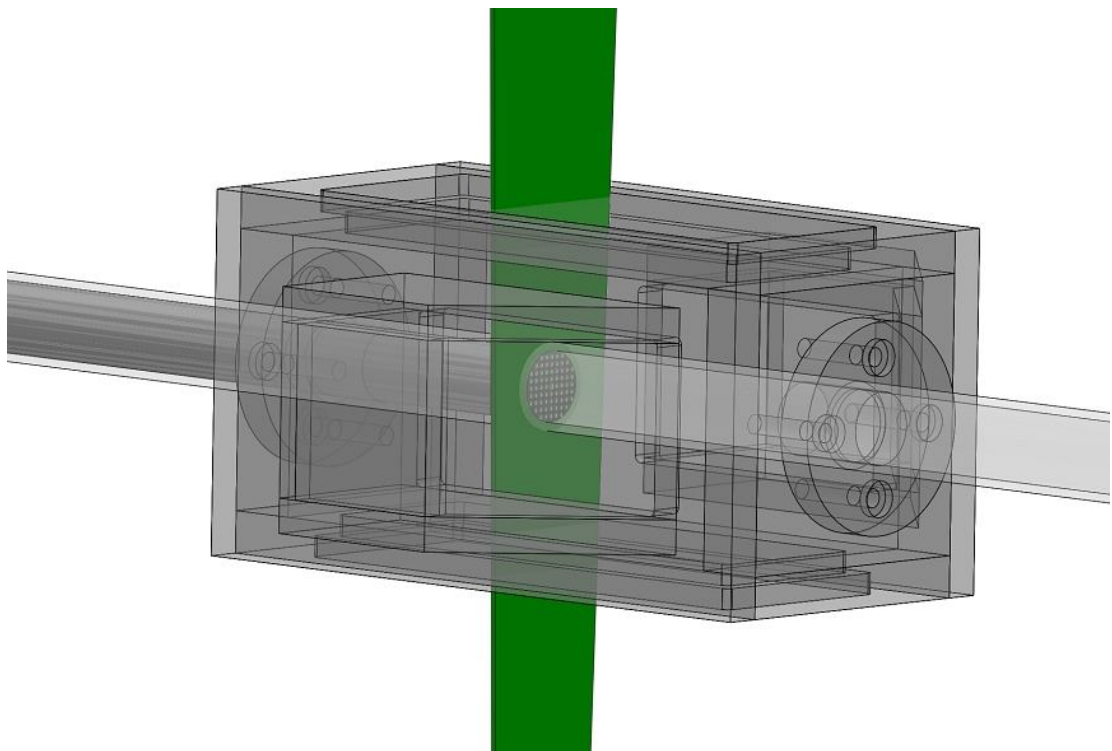


Figura 9 – Alvo de calibração alinhado com o plano de laser

O tubo de testes foi preenchido com a solução de água e rodamina e uma imagem do alvo foi capturada por cada câmera, utilizando uma luz contínua de lâmpada incandescente. As imagens apresentadas na Figura 10 são visualizações, da malha de pontos da face do calibrador dentro do tubo com a solução, obtidas pelas câmeras da esquerda e da direita.

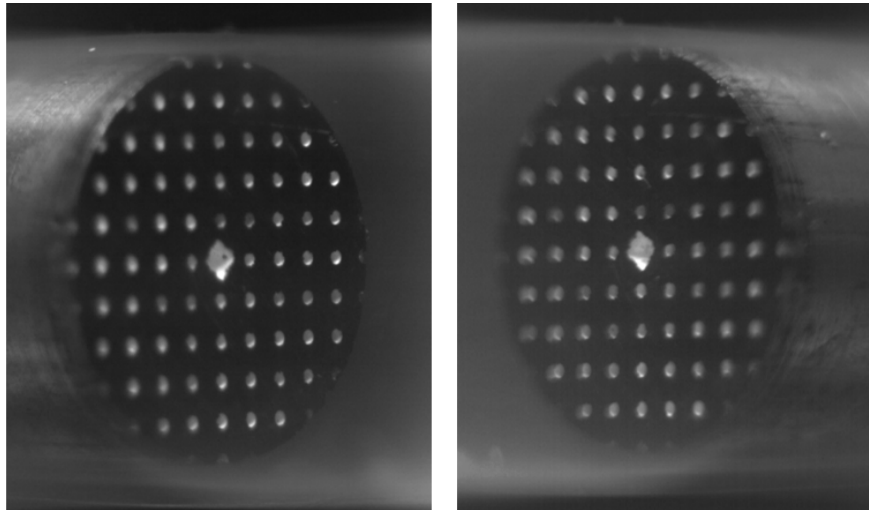


Figura 10 – Alvo de calibração em ângulo conforme visto pelas câmeras da esquerda e da direita.

Para a distorção das imagens foi necessário a criação de um programa que fizesse esse processo automaticamente. Este usa um polinômio que distorcer a imagem a fim de reconstruir a seção transversal do escoamento. Essa rotina de distorção de imagens foi desenvolvida em MATLAB<sup>®</sup>, utilizando o método de *Random Sample Consensus*, RANSAC.

RANSAC é um método que estima parâmetros matemáticos a partir de dados observados. É um algoritmo não determinístico que produz resultados razoáveis dependendo do número de iterações permitidas. O funcionamento se baseia em que os dados observados são pontos *inliers* – cuja distribuição é explicada pelos parâmetros do modelo – e *outliers* – pontos classificados como ruído, incorretamente medidos ou com erro na interpretação dos dados. Este método é bastante empregado para resolver o problema de correspondência na estimativa da matriz fundamental relacionada com o par de câmeras em configuração estéreo. O método RANSAC é resumido da seguinte forma:

Alguns pontos são selecionados aleatoriamente dentre os observados. Estes, considerados hipoteticamente *inliers*, são utilizados para o ajuste inicial do modelo através de transformação linear direta, enquanto 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*. O modelo é então reestimado com todos os pontos classificados como *inliers*. Depois é avaliado através do erro estimado entre os pontos hipoteticamente *inliers* e o modelo ajustado. O procedimento é repetido determinado número de vezes produzindo diferentes modelos ajustados. O modelo que tiver o menor erro e o maior número de pontos hipoteticamente *inliers* é considerado o melhor para os pontos observados.

Depois de distorcer as imagens de ambos os lados, estas sofrem um processo de união para completar a imagem instantânea da seção transversal.

Depois do processo de calibração, ocorre a aquisição de imagens. Estas foram feitas com resolução de 1024x1280, permitindo a captura do tubo por completo. Em seguida é feita a correção da distorção, a unificação das imagens da direita e da esquerda utilizando o polinômio obtido no processo de calibração e a aplicação da máscara. Na Figura 12 é demonstrado todo o processo.

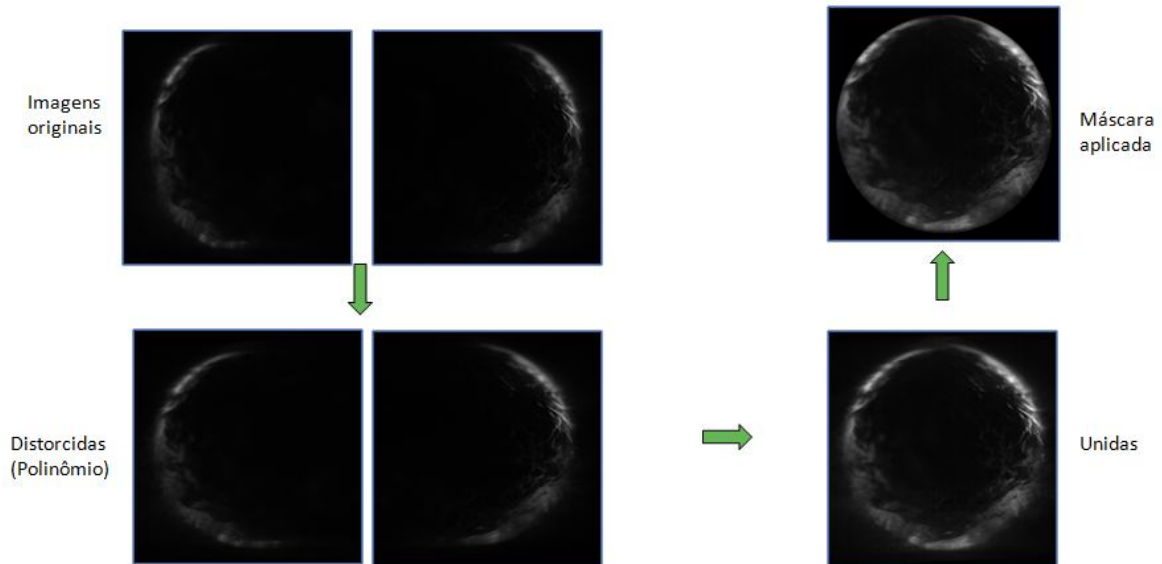


Figura 12 – Procedimento de reconstrução da seção transversal do escoamento

Na Figura 13 pode-se observar um esquema da imagem da transversal reconstruída 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 espessura de filme,  $h(t)$ , foi extraída em duas regiões pré-definidas pelo usuário, chamadas de sondas. Devido ao grande número de imagens capturadas em cada experimento, para extrair informações quantitativas, foram desenvolvidos algoritmos em MATLAB®. Esses algoritmos realizavam várias tarefas, sendo as mais importantes uma equalização de histograma, com o objetivo de aumentar o contraste, seguida por uma binarização. A espessura de filme líquido é então extraída através da soma de pixels de valores lógicos “1”, iniciando a contagem a partir da posição interna do tubo, definida pela máscara.

Este procedimento é realizado para uma sonda fixa sempre localizada a zero graus como esquematizado na Figura 13. Portanto, as espessuras de filme líquido em outras posições circunferências foram obtidas aplicando uma transformação de rotação na imagem como pode ser observado na figura 14.

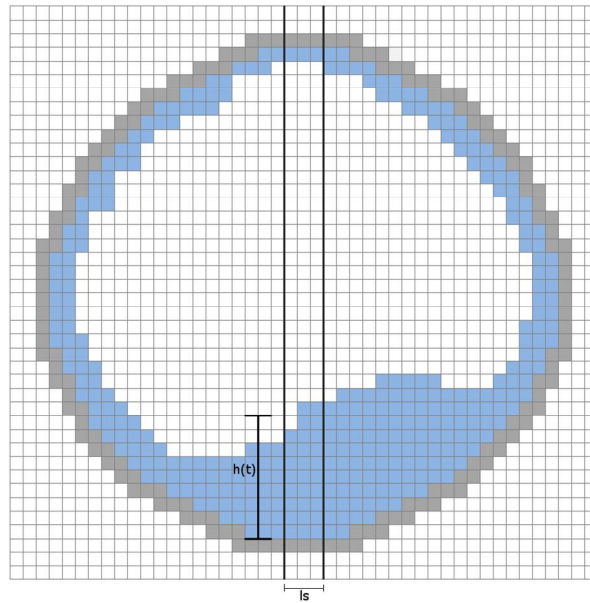


Figura 13 – Esquema que auxilia na definição de sonda. Cada quadrado representa um pixel e os dois traços mais espessos a região da sonda.

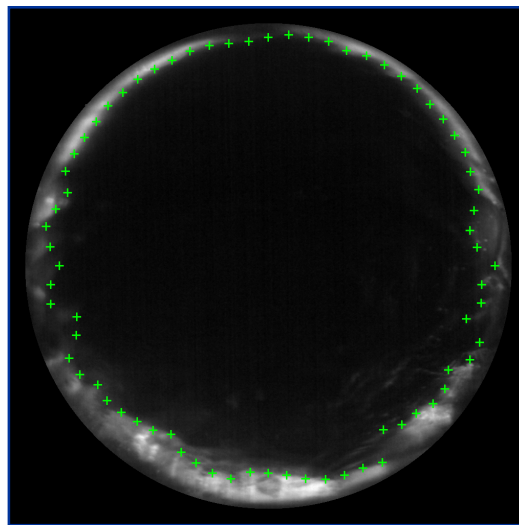


Figura 14– Imagem transversal da seção com sondas a cada 5 graus

## Resultados

Este trabalho apresentou uma técnica óptica desenvolvida para gerar dados sobre o filme líquido em função do tempo. No método de visualização apresentado, imagens estereoscópicas da seção transversal do filme líquido são obtidas e processadas para gerar informações quantitativas sobre o filme em todo o perímetro do tubo. Foram realizadas medições na parte inferior do tubo, onde a iluminação de laser era suficiente. Os resultados obtidos são comparados com os obtidos pela técnica de visualização longitudinal [1].

A Figura 15 mostra a densidade do espectro de frequências obtida pelas técnicas

longitudinal e estereoscópica, para  $U_{sg}=20$  m/s e  $U_{sl}=0,140$  m/s. Para estas condições de escoamento da figura 15, as espessuras médias de filme obtidas pelas técnicas longitudinal e estereoscópica foram, respectivamente, 0,88 e 0,87 mm, o que mostra o potencial da técnica estereoscópica desenvolvida.

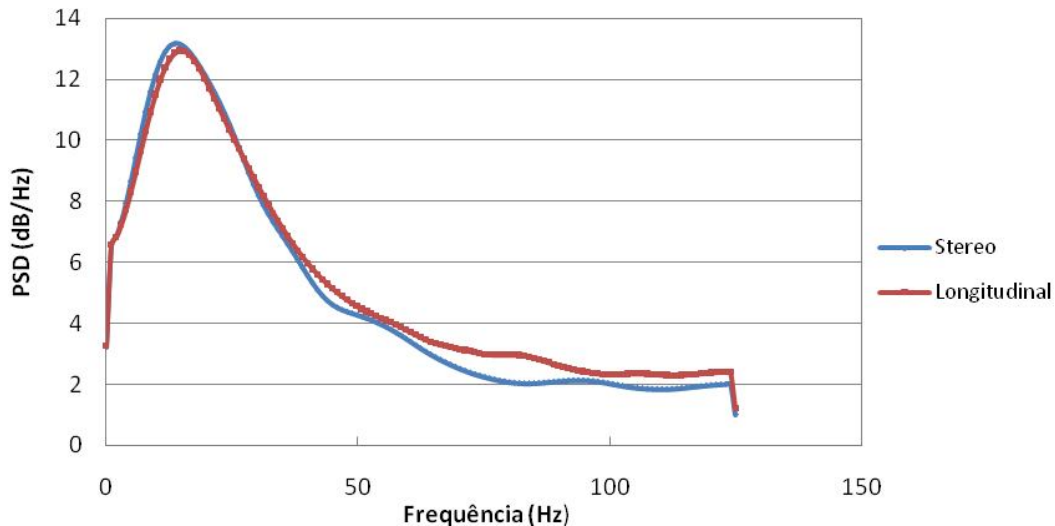


Figura 15: Comparação da densidade do espectro de frequências de espessura de filme na parte inferior do tubo obtida pelas técnicas longitudinal e estereoscópica, para  $U_{sg}=20$  m/s e  $U_{sl}=0,40$  m/s.

## Conclusão

Fluorescência Induzida a Laser foi usada para capturar imagens nítidas, onde fosse possível separar a região do filme líquido da fase gasosa. A qualidade das imagens obtidas permitiu a observação do comportamento da interface em toda a circunferência do tubo. Foram obtidas imagens capazes de fornecer dados quantitativos e qualitativos, utilizando técnicas de visualização com o auxílio do programa desenvolvido. A comparação dos dados obtidos em relação aos resultados da visualização longitudinal validou a técnica.

A iluminação não uniforme e a difusão da luz fluorescente ainda são um problema. No entanto, estamos tentando desenvolver uma solução para o próximo trabalho, onde será possível extrair mais dados quantitativos do filme líquido ao redor do tubo.

## Referências Bibliográficas

- [1] P.S.C. Farias, F.J.W.A. Martins, L.E.B. Sampaio, R. Serfaty and L.F.A. Azevedo. "Optical Liquid Film Characterization of Horizontal, Annular, Two-Phase, Gas-Liquid Flow". 7th International Conference on Multiphase Flow, ICMF. Tampa, FL USA, June 2010.
- [2] Rodríguez, D. J. & Shedd, T. A.. "Cross-sectional imaging of the film in horizontal two-phase annular flow". ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference, Charlotte, North Carolina, USA. July 2004.
- [3] Taitel, Y. & Dukler, A.E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. AICHE Journal. Vol. 22, 1976.