

ESTUDO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO AR-ÁGUA, ANULAR, HORIZONTAL, EMPREGANDO TÉCNICAS ÓPTICAS DE ALTA FREQUÊNCIA

Aluno: Carlos Eduardo Rodrigues

Orientador: Luiz Fernando Alzuguir Azevedo

1. Introdução

O escoamento bifásico de líquido e gás em dutos está presente em diversas aplicações industriais. Na indústria do petróleo, em particular, gás e líquido escoam simultaneamente nos poços, dutos de produção e transporte e em equipamentos de processamento, apresentando distintos padrões de escoamento entre as fases líquida e gasosa. Os arranjos entre as fases que definem os padrões de escoamento dependem de diversos fatores, como vazões de líquido e gás, propriedades dos fluidos, condições termodinâmicas do escoamento e geometria do duto.

A previsão numérica completa de escoamentos bifásicos é ainda uma tarefa longe de ser alcançada, apesar dos significativos avanços observados nas últimas décadas. Cada fase que compõe o escoamento é governada por equações bem conhecidas que representam os princípios básicos de conservação de massa, energia e quantidade de movimento linear e angular. Caso cada fluido fosse bem representado por uma equação constitutiva adequada, seria possível, em princípio, prever o movimento dos fluidos e, conseqüentemente, caracterizar completamente o escoamento multifásico. Entretanto, o desconhecimento da posição das interfaces que delimitam as fases, da natureza dos fluxos de massa, energia e quantidade de movimento entre as fases e a natureza muitas vezes turbulenta do escoamento, torna necessária a utilização de informações obtidas de experimentos.

O presente trabalho foi motivado por uma aplicação oriunda da área de refino, onde um processo envolvendo o escoamento simultâneo de líquido e gás corrosivo produzia taxas de corrosão nas paredes do duto muito superiores aos valores esperados para o tipo de material especificado. Observou-se que as regiões de corrosão acelerada estavam presentes a jusante de acidentes no duto, tais como, curvas, poços de termopar e cordões de solda. Como o padrão de escoamento prevaiente era o anular horizontal, atribuiu-se as taxas de corrosão elevadas a perturbações causadas pelos acidentes presentes no duto sobre o filme de líquido de pequena espessura que recobre a parede do duto, e é característico deste padrão de escoamento.

Para auxiliar na compreensão dos fenômenos físicos envolvidos no processo de corrosão acelerada das paredes do duto, foi iniciado um programa de investigação do comportamento do filme de líquido baseado na simulação numérica das equações que governam o escoamento tri-dimensional transiente de líquido e gás em um duto horizontal operando em regime anular. O escoamento bifásico anular oferece enormes dificuldades à modelagem computacional pela natureza turbulenta das fases e pela complexa geometria da interface gás-líquido. Além, disso ainda há na comunidade científica dúvidas com relação aos mecanismos responsáveis pela manutenção do filme de líquido molhando a parte superior da parede do duto horizontal, contrariando o efeito da gravidade.

Para validar as simulações numéricas e auxiliar na compreensão dos mecanismos físicos envolvidos, foi iniciado um programa experimental que tinha como objetivo inicial o desenvolvimento de técnicas de visualização de escoamento para obter o comportamento transiente da interface gás-líquido no escoamento anular horizontal. Ao longo do trabalho, a técnica de visualização desenvolvida para fornecer informações qualitativas foi transformada em uma poderosa técnica capaz de fornecer informações quantitativas ainda não disponíveis na literatura internacional. A descrição do desenvolvimento desta técnica original é o foco do presente documento.

2. Fundamentação Teórica

No escoamento bifásico horizontal o líquido escoar na forma de um pequeno filme de espessura não uniforme ao longo da circunferência do duto, enquanto o gás escoar pelo centro. O filme de líquido neste regime apresenta uma estrutura ondulatória, formada por ondas de pequena amplitude sobre o filme base (*ripples*) movendo-se com pequena velocidade, e ondas de perturbação maiores e mais rápidas (*disturbance waves*). Gotas de líquido capturadas pelo gás também colaboram para o transporte do líquido. A medição e previsão da distribuição transiente e não uniforme do filme de líquido ao longo da circunferência do duto tem sido o principal foco dos trabalhos de pesquisa, juntamente com a previsão da queda de pressão no escoamento. Na Figura 1, o escoamento bi-fásico anular horizontal é representado esquematicamente.

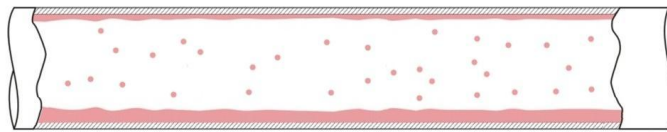


Figura 1. Representação esquemática do escoamento anular horizontal.

Uma das questões fundamentais relacionadas ao comportamento do filme de líquido está relacionada aos mecanismos que mantêm o filme na parte superior do duto, contrariando o efeito da gravidade. Diversos mecanismos foram propostos, como indicados, por exemplo, no trabalho de Jayanti et al. (1990). Estes mecanismos são: (i) escoamento secundário no núcleo gasoso, (ii) espalhamento do filme de líquido com a passagem da onda, (iii) bombeamento do filme de líquido e, (iv) entranhamento e deposição de gotas arrancadas pela corrente gasosa. Recentemente, Oliveira & Portela (2010) propuseram ainda outro mecanismo baseado no gradiente axial da tensão cisalhante interfacial.

Ao longo de décadas de pesquisas foram utilizadas técnicas de visualização de escoamentos como ferramentas para auxiliar na caracterização do comportamento transiente do filme de líquido em escoamento anular horizontal. As diferentes técnicas acompanharam o desenvolvimento cronológico das tecnologias de captura de imagens: (i) cinematografia de alta velocidade (Taylor & Nedderman, 1968), (ii) ativação fotocromica com câmeras digitais de alta velocidade (Hewitt et al., 1990), (iii) reflexão total (Shedd & Newell, 1998) e, (iv) Fluorescência Planar Induzida a Laser (Rodríguez & Shedd, 2004). No entanto, a maior parte dos trabalhos publicados na literatura sobre a estrutura do escoamento anular bifásico foi obtida por meio de sondas pontuais baseadas em princípios elétricos (Jayanti et al., 1990 e Paras & Karabelas, 1991) onde não era possível visualizar a dinâmica completa do escoamento. Vassalo (1999) utilizou sondas elétricas do tipo fio quente, no estudo dos perfis de velocidade dentro do filme de líquido para o escoamento vertical. Um grande avanço na medição das características dinâmicas de filmes de líquido em escoamento bifásico anular foi apresentado recentemente no trabalho de Belt et al. (2010) utilizando uma técnica intrusiva formada por uma matriz de sensores condutivos montados rente às paredes para a medição da espessura de filme líquido.

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver técnicas de visualização para a caracterização qualitativa e quantitativa do escoamento bifásico horizontal ar-água em regime anular. As técnicas implementadas baseiam-se na visualização longitudinal e transversal do escoamento a altas frequências, seguida de processamento digital das imagens capturadas, para a determinação automática da variação temporal da espessura do filme de líquido. São técnicas não intrusivas com boa resolução temporal e espacial, e que apresentam como principal característica o fato de disponibilizarem, para análise visual, cada imagem de onde foram extraídas as informações quantitativas. Os resultados obtidos no presente trabalho

contribuem para um melhor entendimento dos parâmetros que governam a dinâmica deste padrão de escoamento, assim como para a validação das simulações numéricas de escoamentos de mais de uma fase.

3. Metodologia Experimental

Um dos principais problemas encontrados na visualização de escoamentos bifásicos gás-líquido, e do escoamento anular em particular, origina-se do intenso espalhamento da luz incidente nas interfaces, que impede a visualização da fase líquida. Para contornar este problema, foi utilizada a técnica ótica de visualização conhecida como Fluorescência Planar Induzida por Laser, Planar Laser Induced Fluorescence – PLIF (Rodríguez and Shedd, 2004). Nesta técnica, é empregada uma substância fluorescente, Rhodamina B, dissolvida em pequenas concentrações na água. Esta solução ao ser iluminada pela luz verde de um laser, com comprimento de onda de 527 nm, emite luz em um comprimento de onda superior, 610 nm, correspondente à luz vermelha. A luz verde intensa refletida nas interfaces ar-água é bloqueada por um filtro óptico colocado em frente à câmera que registra as imagens do escoamento, permitindo somente a passagem de comprimentos de ondas elevados relativos a fluorescência, emitida pela Rhodamina dissolvida na água. Desta forma obtém-se uma clara visualização da fase líquida do escoamento sem a interferência das intensas reflexões provenientes das interfaces.

Uma dificuldade adicional encontrada por técnicas óticas de visualização, especialmente em escoamentos bifásicos, é a diferença de índices de refração entre o meio externo e a parede do tubo, e entre a parede do tubo e o fluido de trabalho. No presente trabalho, este tipo de problema torna-se ainda mais relevante, pois deseja-se capturar o comportamento de filmes de líquido de pequena espessura junto à parede do tubo, região onde as distorções óticas devido à curvatura são mais relevantes. Para minimizar esses efeitos, foi utilizado um tubo fabricado em FEP (Fluorinated Ethylene Propylene), um material com o índice de refração muito próximo ao da água (Hewitt et al., 1990). Na região de visualização do escoamento foi montada ao redor do tubo uma caixa de acrílico com paredes planas, preenchida com água, de modo a minimizar as distorções óticas da curvatura do tubo.

A Figura 2(a) apresenta uma visão geral esquemática da seção de testes construída para a medição do filme de líquido na geratriz inferior do tubo em escoamento anular horizontal ar-água. A solução de água com Rhodamina é bombeada para a seção de testes formada por um tubo de FEP com 15 mm de diâmetro e 255 diâmetros de comprimento. Ar é bombeado para a seção de testes por meio de um compressor centrífugo. As correntes de ar e água passam por medidores de vazão encontrando-se em um misturador na forma de “T” onde o escoamento bifásico é formado. Após a passagem na tubulação da seção de testes o escoamento bifásico é conduzido ao separador de ar e líquido.

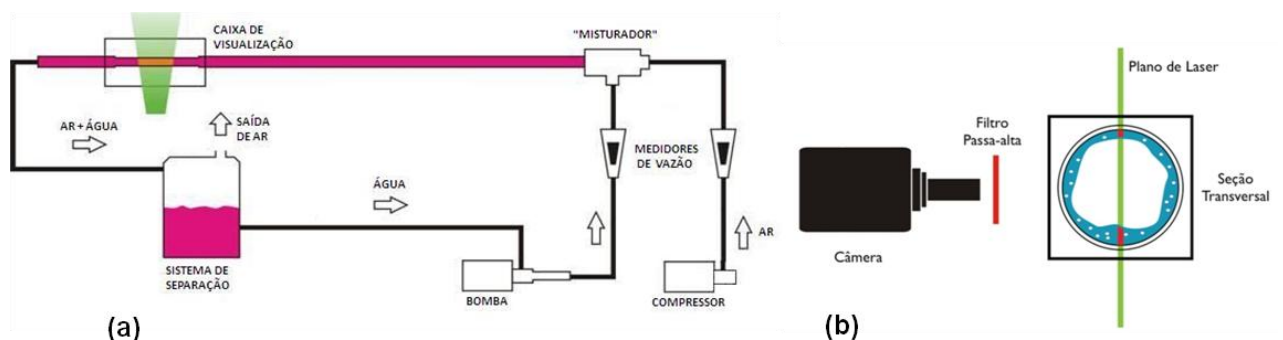


Figura 2. (a) Vista geral esquemática da seção de testes construída.
(b) Detalhe da técnica de visualização.

Um plano de luz, de 20 mm de largura e 0,5 mm de espessura, proveniente de um laser pulsado iluminava o escoamento longitudinalmente segundo um plano meridional no interior da seção de testes, como ilustrado esquematicamente na Figura 2(b). Imagens longitudinais instantâneas do filme de líquido inferior foram capturadas com frequências de 250 Hz a 3000 Hz e com uma resolução espacial de 512x512 pixels, utilizando uma câmera de alta frequência de aquisição de imagens, IDT Motion Pro X3, posicionada ortogonalmente ao plano de iluminação. Um sincronizador de sinais e um programa controlador foram empregados para garantir a precisa sincronização do disparo do laser e a captura das imagens pela câmera digital. O laser empregado foi do tipo Nd-YLF capaz de disparar pulsos com frequências de até 3000 Hz.

Para a determinação da espessura do filme de líquido a partir das imagens longitudinais capturadas era necessário realizar um procedimento de calibração que determinava a correspondência entre as dimensões reais do escoamento e as dimensões em pixels na imagem. Este procedimento de calibração foi realizado utilizando-se um alvo, com uma grade de espaçamento conhecido, inserido dentro do tubo de testes e visualizado pela câmera. A Figura 3 apresenta o alvo de calibração longitudinal.

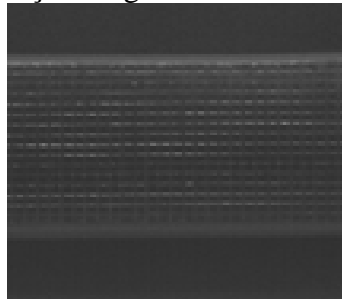


Figura 3: Alvo de calibração longitudinal

A visualização da seção transversal completa do filme líquido foi realizada empregando duas câmeras de alta velocidade montadas em um arranjo estereoscópico em um ângulo de 45° em relação ao eixo do tubo, como ilustrado na Figura 4. Esta montagem permitia a observação da seção transversal do escoamento através de duas janelas inclinadas disponíveis na caixa de visualização. Neste caso, o plano de luz foi girado de 90°, em relação à configuração utilizada para visualização longitudinal, de modo a iluminar a seção transversal do tubo.

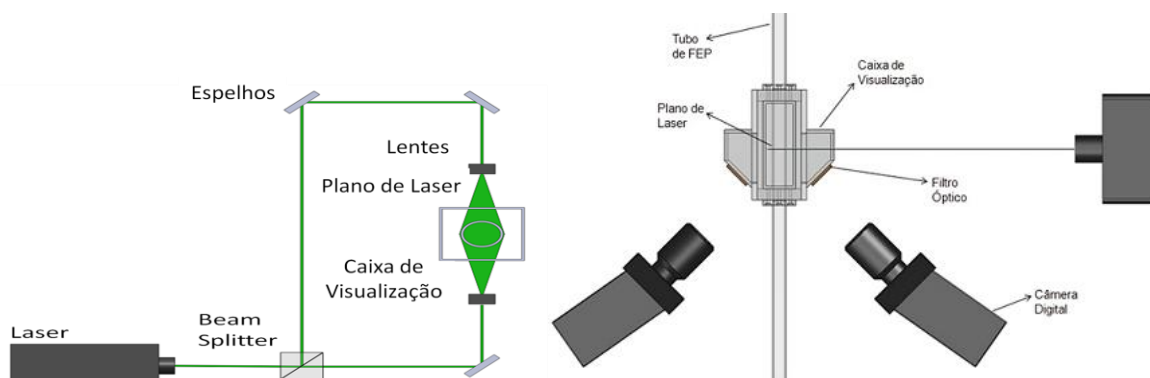


Figura 4. (a) Visão esquemática do arranjo óptico montado. (b) Montagem estereoscópica para a visualização da seção transversal do escoamento.

Para a determinação da espessura de filme ao redor do tubo foi utilizado um alvo de calibração com a face transversal ao tubo e com a grade radial de pontos. A Figura 5 apresenta o alvo de calibração transversal e as imagens distorcidas deste alvo capturadas pela câmera da esquerda e da direita e após a aplicação do procedimento de distorção e união das

imagens que será descrito na próxima seção. Pode-se verificar na figura que a imagem original do alvo é recuperada pelo procedimento de distorção empregado.

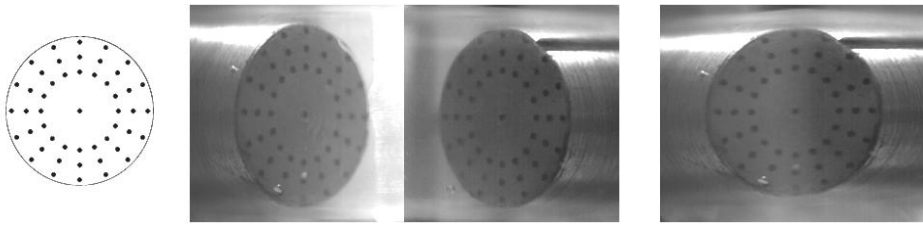


Figura 5: Alvo de calibração, imagens do alvo capturadas pelas câmeras da esquerda e da direita e imagem resultante distorção e união das duas câmeras.

As imagens originais capturadas com as câmeras da esquerda e da direita apresentavam-se deformadas devido ao ângulo de observação de cada câmera. Um procedimento automático foi desenvolvido em MATLAB®, para corrigir a distorção destas imagens através da determinação de dois polinômios de distorção, um para câmera da esquerda e outro para a da direita. Estes polinômios eram determinados a partir do mapeamento da imagem distorcida do alvo de calibração que possuía em sua face uma malha de pontos com espaçamentos regulares. Estes dois polinômios eram então aplicados a todas as imagens do escoamento capturadas posteriormente nos experimentos com escoamento.

3.1. 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 das imagens. A tarefa das rotinas de processamento era fornecer a espessura do filme de líquido em uma ou mais posições axiais especificadas, denominadas sondas de medição, em cada quadro capturado pela câmera digital.

Na Figura 6 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 $ls1$ e $ls2$, estando afastadas de uma distância axial ds . A espessura do filme líquido medida em um determinado instante, $h(t)$, é avaliada como a média da altura das colunas de pixels que definem a sonda de medição. A largura da sonda funciona como um filtro espacial de média aplicado ao sinal de espessura do filme de líquido. A decisão se um dado pixel pertence ao líquido ou ao gás depende do método de binarização utilizado, como será descrito adiante.

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. Deve-se mencionar também que a medição da espessura do filme de líquido em duas posições axiais distintas foi realizada para permitir calcular a

velocidade das ondas de líquido características do escoamento anular, como será descrito mais adiante.

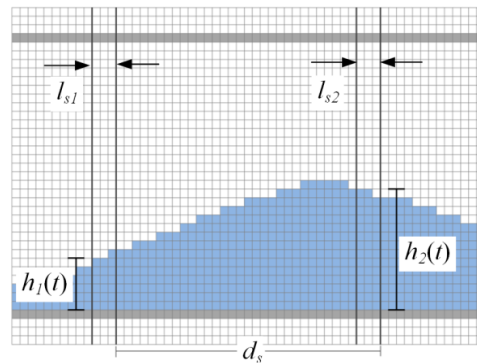


Figura 6. Representação esquemática da sonda para medição da espessura do filme de líquido sobre imagem digitalizada.

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 e facilitar a detecção da interface líquido-gás. Basicamente, o algoritmo desenvolvido realiza uma transformação não linear no histograma da imagem original que, em nossa aplicação, geralmente se apresentava comprimido. Assim, a transformação implementada buscava 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. Uma característica particular, e original, 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, tornando a equalização 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 Figura 7(a) apresenta uma imagem típica do filme de líquido visualizada longitudinalmente utilizando a técnica PLIF. Abaixo desta, a Figura 7(b) apresenta 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 de pixels concentrada na faixa entre 0 a 0,6. As Figuras 7(c) e (d) apresentam o efeito da aplicação do algoritmo de equalização do histograma desenvolvido sobre a imagem original capturada. O contraste da imagem aumentou significativamente, e a operação de binarização pode ser facilmente realizada. A Figura 7(e) mostra a imagem resultante da operação de binarização utilizando um limiar de corte (*threshold*) apropriado.

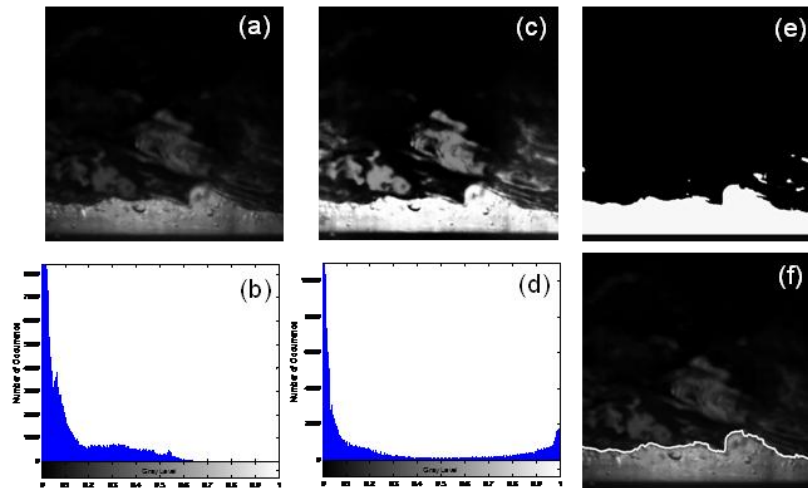


Figura 7. (a) Imagem típica do filme líquido inferior em escoamento anular horizontal ar-água (b) Histograma da imagem original. (c) Imagem processada utilizando equalização do histograma por coluna. (d) Histograma da imagem processada. (e) Imagem binarizada. (f) Espessura de filme líquido medida superposta à imagem original.

A determinação da espessura do filme é realizada na imagem binarizada, em cada coluna de pixels que forma a sonda de medição, somando-se todos os pixels de valor “1”, correspondente a fase líquida, a partir da posição da parede inferior do tubo, até que seja encontrado o primeiro valor lógico “0”, correspondente à fase gasosa (interface). Na Figura 7(f) uma linha branca, correspondente à espessura de filme líquido determinada pelo programa, foi superposta à imagem original, Figura 7(a), para verificação. A concordância obtida é considerada excelente. As manchas brancas acima do filme líquido, mas não conectadas a ele, são imagens de líquido fora do plano de iluminação e não devem ser computadas como fazendo parte do filme de líquido.

3.2. Processamento de Imagens Transversais

O pré-processamento aplicado nas imagens instantâneas do 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. As Figuras 8(a) e (b) apresentam as imagens do filme de líquido visualizado em ângulo pelas câmeras da esquerda e da direita. Cada câmera fornece então imagens de metade do escoamento da seção transversal no interior do tubo. Em seguida, os polinômios obtidos no procedimento de calibração, eram aplicados a cada par de imagens que compunha a seção transversal do escoamento. As Figuras 8(c) e (d) ilustram as imagens resultantes após o procedimento de distorção aplicado nas imagens das Figuras 8(a) e (b). O par de imagens já distorcidas das câmeras da direita e esquerda era então unido, utilizando as coordenadas conhecidas das posições do centro do alvo de calibração, desta forma, a imagem transversal instantânea completa do filme de líquido era formada. 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 preta circular sobre todas as imagens. A Figura 8(e) ilustra uma imagem típica do filme da seção transversal do escoamento reconstruída após a aplicação da máscara.

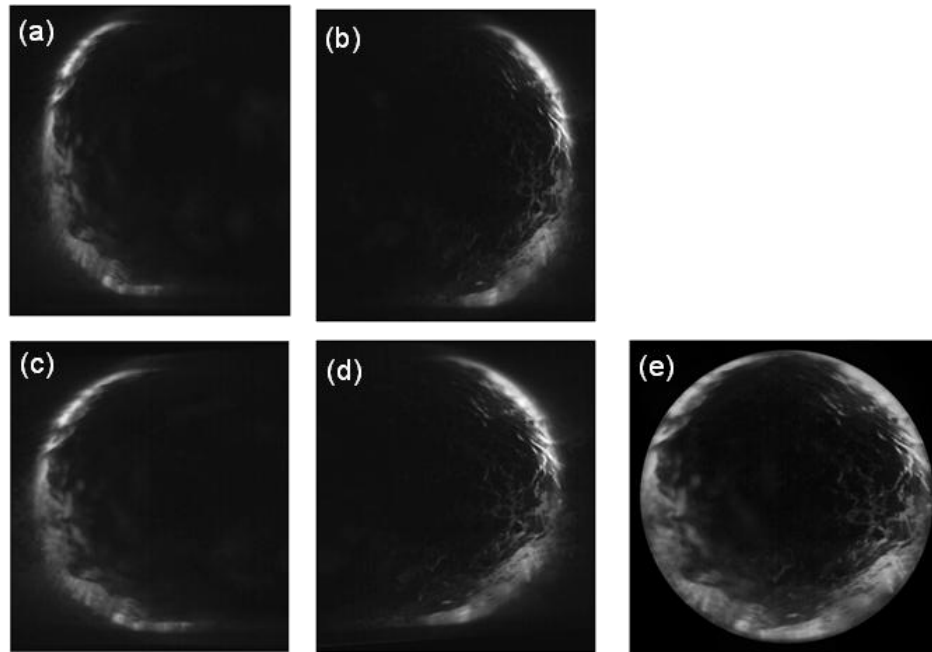


Figura 8. (a) Imagens observadas em ângulo do filme de líquido, capturada pela câmera da esquerda e (b) da direita. (c) Imagem da câmera da esquerda distorcida. (d) Imagem da câmera da direita distorcida. (e) Imagem instantânea típica após a união das imagens capturadas pela câmera da esquerda e da direita.

As imagens pré-processadas eram então binarizadas e a espessura de filme de líquido era calculada seguindo o mesmo procedimento utilizado nas medições de imagens longitudinais. Este procedimento era realizado para uma sonda fixa sempre localizada a zero grau (filme líquido inferior). 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.

3.3. Medições quantitativas do escoamento

Devido à limitação da memória da câmera, a espessura de filme e velocidade de onda foram capturados em experimentos independentes, utilizando diferentes frequências de aquisição e resolução das imagens (magnificação óptica), uma estratégia de fundamental importância para garantir níveis de incerteza na medição dentro de limites aceitáveis. As imagens utilizadas para medição longitudinal da espessura de filme de líquido foram capturadas com uma resolução de 512x512 pixels a uma frequência de 250 Hz, permitindo a gravação de cerca de 52 segundos de escoamento. Imagens da seção transversal do filme foram capturadas com uma resolução espacial de 1024x1280 pixels, o que permitia, para uma frequência de aquisição de 250 Hz, um registro máximo de 26 segundos para cada teste conduzido.

A espessura média do filme de líquido foi determinada pela média temporal da espessura de filme, $h(t)$, para todo o registro do sinal capturado. O desvio médio quadrático da espessura média de filme, valor *RMS*, foi calculado para complementar a caracterização estatística do escoamento. As informações sobre o conteúdo espectral do sinal de espessura de filme de líquido foram obtidas pela determinação da densidade espectral de potência do sinal (PSD),

utilizando janelas de Hamming para suavizar os resultados (Bendat & Piersol, 1971), que se apresentaram ruidosos devido à limitação da memória da câmera.

A velocidade das ondas do filme de líquido foi determinada a partir da correlação cruzada de dois sinais simultâneos de espessura de filme medidos em duas posições axiais, sonda 1 e 2, espaçadas de uma distância, ds , pré-determinada. A velocidade da onda em m/s, v , era determinada pela razão entre o espaçamento entre as sondas de medição, ds , e o tempo de trânsito das ondas, t . O tempo de trânsito era avaliado computando-se o atraso correspondente ao valor máximo da função de correlação cruzada dos sinais de espessura de filme capturados nas posições das duas sondas de medição (Bendat & Piersol, 1971). Em todos os testes realizados para a medição da espessura de filme de líquido, foi usada uma frequência de aquisição de imagens de 3000 Hz, permitindo resultados com níveis de incerteza satisfatórios. Cálculos estatísticos das incertezas foram implementados em uma rotina em MATLAB®. Maiores detalhes sobre os procedimentos adotados na extração de informações quantitativas das imagens podem ser encontrados em Farias, PSC (2010).

4. Resultados

Uma série de experimentos foi realizada para validar as técnicas desenvolvidas no presente trabalho. Estes experimentos cobriram as velocidades superficiais da fase líquida de 0,056 a 0,112 m/s e 20 a 34 m/s da fase gasosa. Estas condições de operação foram escolhidas para permitir comparações com resultados disponíveis na literatura onde outras técnicas experimentais foram utilizadas. De acordo com os mapas de padrões de escoamento disponíveis na literatura, todos os pares de vazão ar-água estudados encontram-se no regime de escoamento anular.

Visualização longitudinal e transversal do filme líquido: A partir das imagens longitudinais e transversais capturadas do filme de líquido, procedimentos de processamento digital de imagens foram utilizados para quantificar a região do filme de líquido em cada imagem, produzindo as informações quantitativas desejadas. A Figura 9(a) ilustra uma sequência de imagens longitudinais do filme líquido inferior, capturadas a uma frequência de 3000 Hz durante a passagem de uma onda. Também podem ser vistos na figura dois marcadores 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.

A Figura 9(b) ilustra uma sequência de imagens típicas transversais do filme de líquido ao redor do perímetro do tubo capturadas a uma frequência de 2000 Hz. Nestas imagens foi capturada a passagem de uma grande onda formada nas condições de velocidades superficiais de ar e água de, respectivamente, 20 m/s e 0,140 m/s. Uma análise qualitativa visual em câmera lenta de uma sequência de imagens, como a apresentada na Figura 9(b), permite observar claramente movimentos circunferenciais do filme líquido ao longo das paredes do tubo.

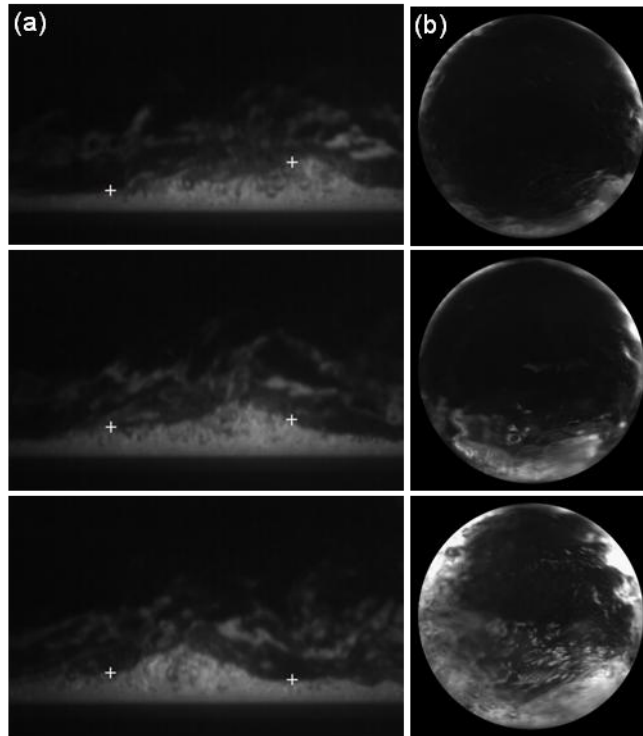


Figura 9. Imagens de uma grande onda no filme líquido para vazão $U_{sg}=20$ m/s e $U_{sl}=0,140$ m/s. (a) Imagens longitudinais do filme de líquido na parte inferior do tubo capturadas a 3000 Hz. (b) Imagens da seção transversal do filme de líquido, capturadas a 2000 Hz.

Variação temporal da espessura de filme de líquido: A Figura 10 apresenta dois resultados típicos da variação temporal da espessura, em milímetros, do filme líquido inferior obtidos aplicando a técnica longitudinal de medição. Uma observação geral das figuras revela a estrutura do filme de líquido composta por grandes ondas, caracterizadas por grandes amplitudes e baixas frequências – as chamadas disturbance waves – e pequenas ondas apresentando pequenas amplitudes e elevadas frequências, normalmente denominadas na literatura como ripples.

Uma análise comparativa dos resultados apresentados nas figuras indica uma tendência de redução da espessura do filme de líquido com o aumento da velocidade superficial do gás, para cada valor fixo da velocidade superficial do líquido. Esta observação é um resultado clássico da literatura de escoamentos anulares, como observado, por exemplo, em Jayanti et al. (1990) e Paras & Karabelas (1991) que utilizaram sondas elétricas para a medição da espessura do filme de líquido.

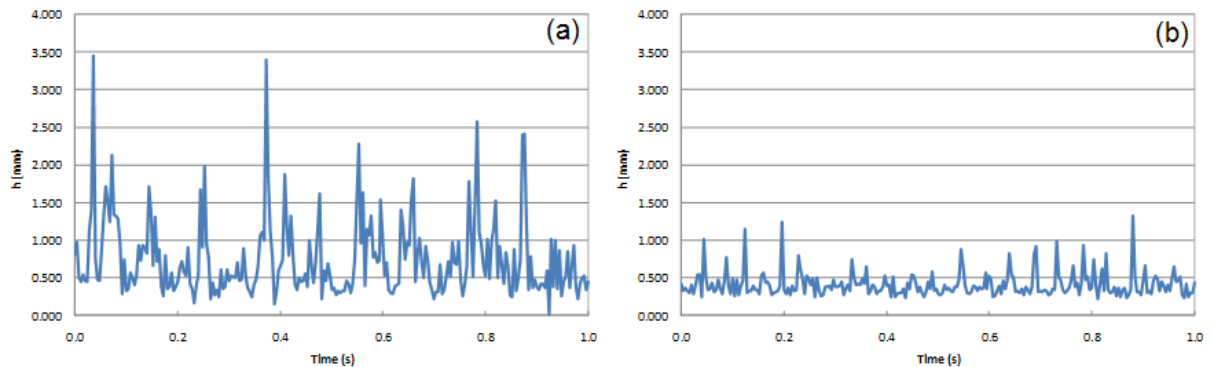


Figura 10. Variação temporal da espessura do filme líquido inferior obtido pela técnica longitudinal de visualização. Resultados para $U_{sl}=0,112$ m/s e (a) $U_{sg}=20$ m/s e (b) $U_{sg}=34$ m/s.

Evolução espacial e temporal das ondas de líquido: A medição da espessura instantânea do filme de líquido ao longo de toda a extensão axial de cada imagem, não somente nas regiões das sondas axiais como apresentado na Figura 7(f), pode ser utilizada para produzir informações relevantes sobre a evolução temporal e espacial do escoamento. Para isso, a espessura do filme foi identificada em toda a largura da imagem, para todas as imagens registradas de um dado experimento. As Figuras 11(a) e (b) apresentam dois mapas de evolução espaço-temporal da espessura de filme de líquido inferior capturado a 3000 Hz durante 0,05 s de escoamento. Estes resultados correspondem a experimentos conduzidos com velocidades superficiais da fase líquida e gasosa de 0,112 m/s e 20 m/s respectivamente.

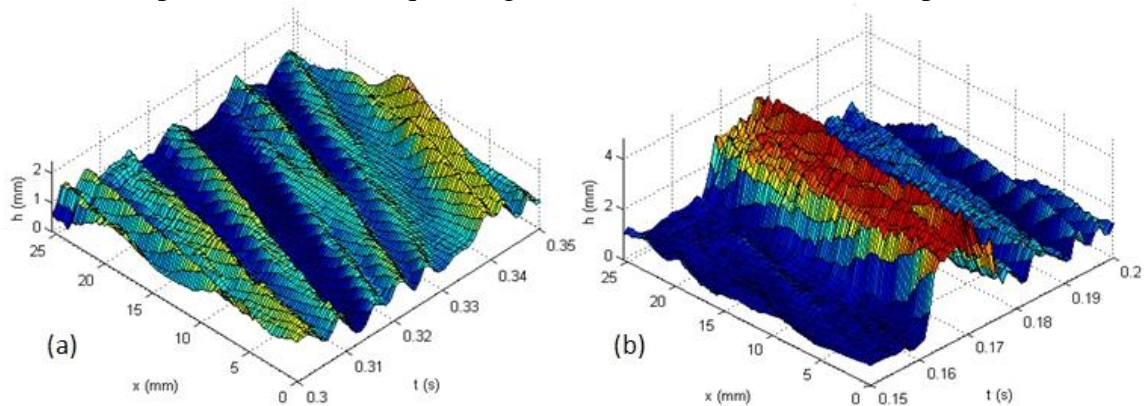


Figura 11. Diagrama espaço-tempo apresentando a evolução das ondas. As imagens originais foram capturadas a 3000 Hz com resolução espacial de 512x512 *pixels*. Resultados para $U_{sl}=0,112$ m/s e (a) $U_{sg}=20$ m/s e (b) $U_{sg}=34$ m/s.

Esta forma de análise do comportamento dinâmico do filme de líquido é um desenvolvimento original na literatura que proporciona resolução temporal e espacial da espessura do filme não alcançáveis por outras técnicas experimentais disponíveis. A dimensão axial das imagens corresponde a 20 mm, limitada pela largura do plano de laser. Nas figuras, x é a direção longitudinal ao comprimento da tubulação e t é o domínio do tempo. Estes mapas permitem identificar a interação e coalescência de ondas de pequena amplitude, formando ondas de grande amplitude. Na Figura 11(b), podemos observar a passagem de uma grande onda. A inclinação das ondas indica também as suas velocidades individuais.

Velocidade das ondas: Um exemplo típico de uma correlação cruzada entre os sinais de espessura de filme líquido capturados pelas duas sondas é ilustrado na Figura 12(a), cuja posição na abscissa, que representa o tempo em número de quadros, determina o atraso entre os sinais. No caso da Figura 12(a), o valor máximo da função de correlação cruzada foi determinado como sendo igual a 4,7 quadros, que para uma frequência de aquisição de 3000 Hz, representa um tempo de trânsito igual 1,57 ms. A velocidade de propagação das ondas é então obtida pela divisão da distância entre as sondas de 8,22 mm por este tempo de trânsito, resultando em 5,24 m/s. Na Figura 12(b) são apresentados os valores de velocidades de onda obtidos para todos os experimentos realizados, em função das velocidades superficiais do gás e do líquido.

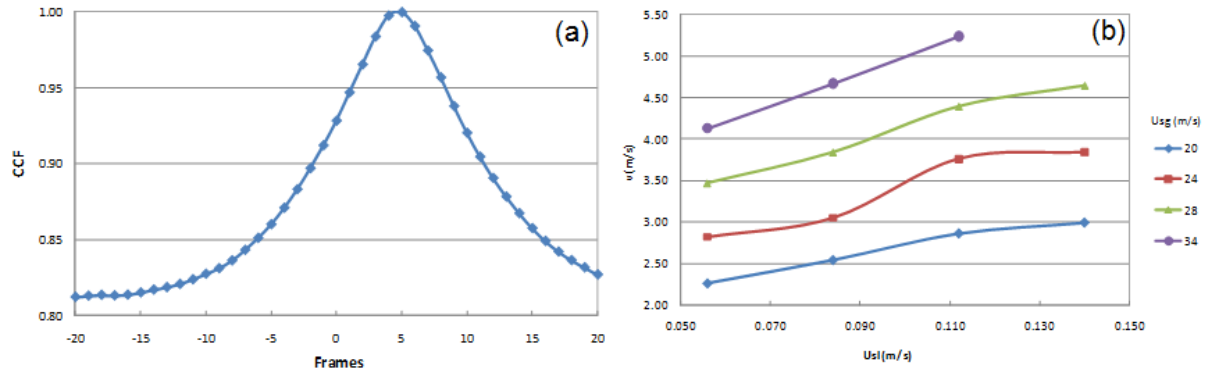


Figura 12. (a) Função correlação cruzada das espessuras de filme em função do tempo medidas nas sondas 1 e 2 para $U_{sg}=34$ m/s e $U_{sl}=0.112$ m/s. (b) Velocidade de onda medida na parte inferior do tubo.

A tendência e os valores de velocidade de onda observados na literatura (Fukano & Ousaka, 1989) foram também verificados nos resultados obtidos com a técnica desenvolvida.

Espectro de frequência (PSD) da espessura de filme líquido: A Figura 13(a) apresenta exemplos de espectros de frequências das ondas determinados pela técnica desenvolvida. Observa-se na figura uma tendência de aumento das frequências dominantes com o aumento da velocidade superficial do gás, observação também em acordo com os trabalhos de Jayanti et al., 1990 e Paras & Karabelas, 1991. Estes resultados demonstram a capacidade da técnica óptica implementada de extrair informações espectrais dos dados de espessura de filme.

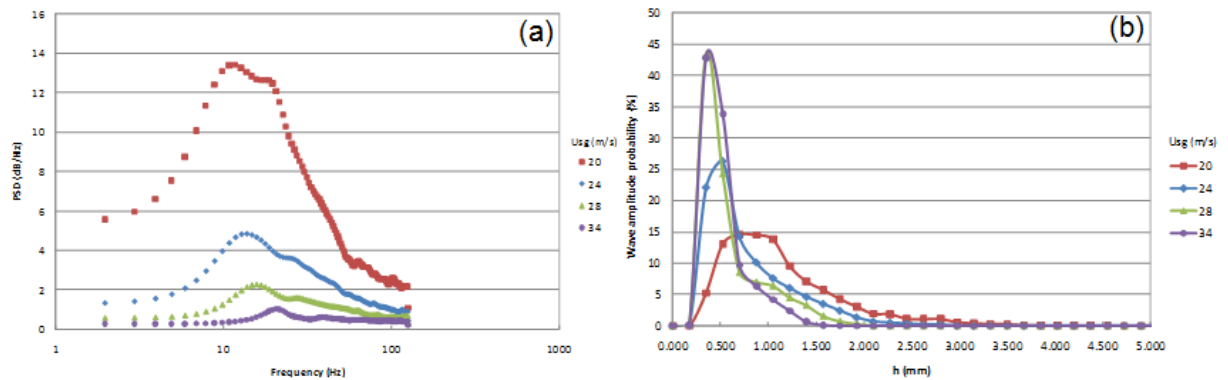


Figura 13. (a) Densidade do espectro de frequências da espessura de filme em função do tempo para diferentes velocidades superficiais de gás e $U_{sl}=0.084$ m/s. (b) Histograma da espessura de filme líquido para $U_{sl}=0,112$ m/s e diferentes velocidades superficiais de gás.

Histograma de espessura de filme líquido: Informações relevantes sobre a distribuição de espessura do filme de líquido podem ser obtidas por histogramas que apresentam a probabilidade de ocorrência de diferentes valores da espessura do filme. Para permitir a comparação entre histogramas para diferentes pares de velocidades superficiais de gás e líquido em um mesmo gráfico, linhas contínuas foram ajustadas pelas barras dos histogramas, como pode ser visto na Figura 13(b). Uma análise desta figura indica uma tendência de aumento da probabilidade de ocorrência de ondas de espessuras cada vez menores, à medida que a velocidade superficial do gás é aumentada de 20 a 34 m/s. Pode-se observar que para velocidades superficiais do gás acima de aproximadamente 28 m/s a maioria dos valores de espessura está agrupada na faixa de 0,5 mm, que é uma indicação do efeito de regularização que o gás impõe nas ondas do filme líquido.

Comparação entre Medidas na Imagem Longitudinal e Transversal: A Figura 14(a) foi preparada para permitir a comparação entre as medições obtidas pela visualização longitudinal e transversal na geratriz inferior do tubo, posição onde as duas técnicas foram aplicadas. A figura apresenta o resultado para o espectro de potência do sinal de espessura de filme, PSD, obtido pelas técnicas longitudinal e transversal, para velocidade superficial do gás e líquido de 20 m/s e 0,140 m/s, respectivamente. Pode-se verificar que a concordância obtida é excelente. Para as condições de escoamento da Figura 14(a), as espessuras médias de filme obtidas pelas técnicas longitudinal e transversal foram, respectivamente, 0,88 e 0,87 mm, o que é mais uma demonstração do nível de concordância obtido pelas duas técnicas. A Figura 14(b) apresenta resultados da medição da espessura instantânea de filme realizada a cada 5 graus ao longo da circunferência do tubo, como indicado pelos marcadores superpostos na figura.

Aplicando os mesmos procedimentos apresentados no presente trabalho para as medições longitudinais, esta técnica permite determinar as propriedades estatísticas e espectrais da espessura do filme de líquido agora em toda a circunferência do tubo. Estes resultados não estão apresentados no presente trabalho.

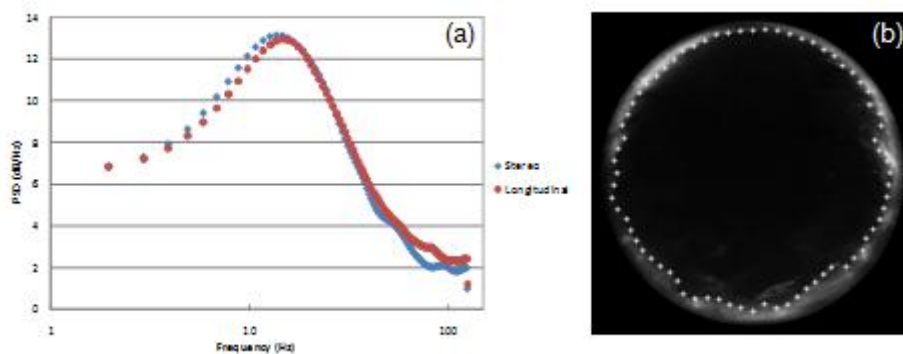


Figura 14. (a) Comparação entre a densidade do espectro de frequências da espessura de filme na parte inferior do tubo usando as técnicas longitudinal (vermelho) e transversal (azul) para $U_{sg}=20$ m/s e $U_{sl}=0.140$ m/s. (b) Medida da espessura de filme instantânea ao redor do tubo.

Técnica em desenvolvimento – PIV: Uma outra técnica de medição utilizada em testes preliminares no presente trabalho denominada Velocimetria por Imagem de Partículas, conhecida pela sigla *PIV* (do inglês, *Particle Image Velocimetry*) é baseada no processamento digital de imagens de partículas traçadoras previamente distribuídas no fluido e iluminadas por plano de luz laser pulsada. Esta técnica vem experimentando um desenvolvimento acentuado nos últimos anos, acompanhando o desenvolvimento das tecnologias de câmera digitais, fontes de luz laser pulsadas, e da capacidade de processamento dos computadores. Trata-se de uma técnica não intrusiva que fornece campos instantâneos de velocidade em regiões extensas do escoamento partir da determinação do campo de deslocamento de partículas traçadoras previamente distribuídas no fluido em um dado intervalo de tempo (Raffel M, 2007). O tempo para a avaliação do deslocamento das partículas deve ser pequeno quando comparado às menores escalas de tempo características do escoamento, de modo que o campo de deslocamento medido possa ser considerado como sendo instantâneo. O campo de velocidade é obtido da razão entre o deslocamento e o tempo. A região onde se deseja medir a velocidade do escoamento é iluminada com o plano de laser e as imagens são capturadas por uma câmera situada em posição ortogonal à seção de testes. Duas imagens são adquiridas num pequeno intervalo de tempo e armazenadas no computador. As imagens armazenadas são divididas em pequenas áreas, chamadas de janelas de interrogação, que são tratadas por métodos estatísticos (correlação cruzada) para determinação do deslocamento das partículas e, por conseguinte, o campo de velocidade desejado.

A técnica de *PIV* aplicada ao escoamento anular está em fase de desenvolvimento, e etapa do projeto encontra-se na escolha da melhor partícula, lentes objetivas e óptica a serem utilizadas. Além disso, encontra-se dificuldade de medir o campo de velocidade em um escoamento onde a fase líquida tem dimensões milimétricas.

A Figura 15 ilustra uma imagem das partículas traçadoras em uma solução líquida. Imagens como esta foram capturadas com o objetivo de identificar o diâmetro de partículas e lentes objetivas ideais para a captura do campo de velocidade do escoamento anular, que fará parte da próxima etapa do projeto.

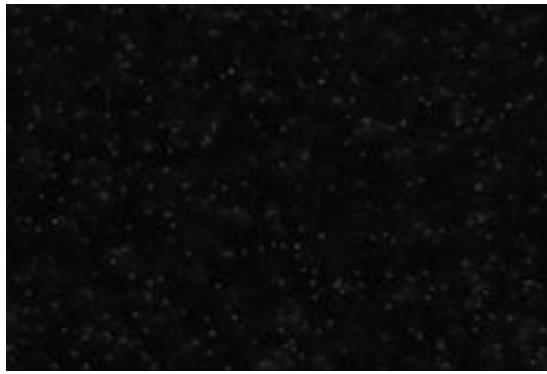


Figura 15: Imagem das partículas traçadoras.

5. Conclusão

No presente trabalho foi desenvolvida e testada uma técnica óptica para a medição das propriedades estatísticas e espectrais da espessura do filme de líquido em escoamento bifásico anular horizontal ar-água. A técnica proposta baseia-se na visualização do escoamento com câmeras digitais de alta frequência de aquisição de imagens, seguida do processamento digital das imagens capturadas, de modo a determinar, de maneira automática, a variação temporal da espessura do filme de líquido.

Para possibilitar a visualização e medição das pequenas espessuras de filme junto à parede do tubo, características de escoamentos anulares, a seção de testes construída utilizou tubos que apresentam o mesmo índice de refração da água. A técnica de Fluorescência Induzida por Plano de Laser (PLIF) foi utilizada para separar a luz emitida pelo filme de líquido daquela, muito mais intensa, refletida pela interface ar-água. Para isso, o escoamento foi iluminado por um plano de luz laser pulsado de elevada energia e frequência de pulsação, sincronizado à câmera digital.

Duas versões da técnica de medição foram implementadas. Em uma delas, a seção longitudinal do filme era iluminada por um plano pulsado de laser e observada por uma câmera digital operando em sincronia com o laser e montada ortogonalmente ao plano de iluminação. Esta versão da técnica fornecia imagens instantâneas da seção longitudinal do filme de líquido na geratriz inferior do tubo. Na segunda técnica implementada, utilizaram-se duas câmeras idênticas de alta taxa de aquisição de imagens posicionadas em um arranjo estereoscópico, gerando imagens instantâneas da seção transversal completa do filme de líquido ao longo da circunferência do tubo, uma visão equivalente àquela que seria obtida por uma câmera hipoteticamente situada no eixo da tubulação observando frontalmente a seção reta do tubo.

Algoritmos de processamento de imagens foram especialmente desenvolvidos para melhorar o contraste das imagens capturadas e medir automaticamente a espessura do filme em posições axiais pré-definidas em cada quadro de imagem capturado. Procedimentos de calibração foram também desenvolvidos para transformar as medidas realizadas na imagem para dimensões reais do escoamento. Os algoritmos desenvolvidos permitiram a

caracterização completa do comportamento dinâmico do filme de líquido fornecendo dados sobre a variação temporal da espessura do filme, os valores médios e RMS da espessura, assim como espectro de potência das ondas contidas no filme, e histogramas mostrando a frequência de ocorrência das diversas faixa de amplitudes das ondas. Também foram medidas as velocidades de propagação das ondas no filme de líquido.

Acredita-se que as técnicas desenvolvidas constituem-se em ferramentas úteis para o estudo de escoamento bifásico líquido-gás. Tratam-se de técnicas não intrusivas com boa resolução temporal e espacial, e que apresentam como principal característica o fato de disponibilizarem para análise visual cada imagem de onde foram extraídas as informações quantitativas. A versão estereoscópica da técnica fornece informações ricas sobre a estrutura instantânea do filme de líquido na seção transversal do tubo que, ainda não estão disponíveis na literatura. Esta característica pode ser bastante útil para auxiliar na compreensão da dinâmica do escoamento e na modelagem numérica do escoamento anular horizontal.

6. Referências

BELT RJ, VAN'T WESTENDE JMC, PRASSER HM, PORTELA LM. Time and spatially resolved measurements of interfacial waves in vertical annular flow. **Int. J. Multiphase Flow** 36:570-587, 2010.

BENDAT JS, PIERSOL AG. Random data: Analysis and measurement procedures. **Wiley-Interscience**. New York, 1971.

FARIAS, PSC. Optical liquid film characterization in two-phase, annular, horizontal flow. **Master dissertation, PUC-RIO**, 2010.

FUKANO T, OUSAKA A. Prediction of the circumferential distribution of film thickness in horizontal and near-horizontal gas-liquid annular flows. **Int. J. Multiphase Flow**. 15:403-419, 1989.

HEWITT GF, JAYANTI S, HOPE CB. Structure of thin liquid films in gas-liquid horizontal flow. **Int. J. Multiphase Flow**, 16:951-957, 1990.

JAYANTI S, HEWITT GF AND WHITE SP. Time-dependent behaviour of the liquid film in horizontal annular flow. **Int. J. Multiphase Flow** 16:1097-1116, 1990.

OLIVEIRA GH, PORTELA LM. The interfacial shear-stress as a film pumping mechanism in annular pipe-flow. **7th Int. Conf. Multiphase Flow**, Tampa USA, 2010.

PARAS SV, KARABELAS AJ. Properties of the liquid layer in horizontal annular flow. **Int. J. Multiphase Flow** 17:439-454, 1991.

RODRÍGUEZ DJ, SHEDD TA. Cross-sectional imaging of the film in horizontal two-phase annular flow. **ASME Heat Transfer/Fluids**. Eng. Summer Conf., Charlotte, USA, HT-FED04-564452004, 2004.

SCHUBRING D, SHEDD TA. Critical friction factor modeling of horizontal annular base film thickness. **Int. J. Multiphase Flow** 35:389-397, 2009.

SHEDD TA, NEWELL TA. Automated optical liquid film thickness measurement method. **Review of Scientific Instruments** 69:4205-4213, 1998.

TAYLOR NSH, NEDDERMAN RM. The coalescence of disturbance waves in annular two phase flow. **Chem. Eng. Science** 23:551-564, 1968.

VASSALO P. Near wall structure in vertical air-water annular flows. **Int. J. Multiphase Flow** 25:459-476, 1999.

RAFFEL M, WILLERT C, KOMPENHANS J. Particle Image Velocimetry – A Practical Guide. **Ed. Springer**, 2007.