

## 9 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 anular horizontal ar-água.

A técnica proposta baseia-se na visualização do escoamento, seguida da determinação automática da variação temporal da espessura do filme de líquido. Para isso, o escoamento foi iluminado por um plano de luz laser de elevada energia e frequência de pulsação. 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. Uma solução do corante rodamina em água foi utilizada como substância fluorescente.

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 fabricados em *FEP (Fluorinated Ethylene Polypropylene)*. Este material apresenta índice de refração muito próximo ao da água, o que minimizou as distorções ópticas.

A captura das imagens do filme de líquido, iluminadas pelo plano laser, foi realizada utilizando-se câmeras digitais de altas taxas de aquisição e boa resolução espacial, operadas em sincronia com o disparo dos pulsos do laser. O laser e a câmera eram capazes de disparar e capturar imagens com frequências de até 3000 Hz, valor suficiente para registrar as informações transientes sobre o filme de líquido. Os sistemas de iluminação e captura de imagens utilizados produziram imagens de alta qualidade que auxiliam na interpretação da dinâmica do filme de líquido.

Duas versões da técnica de medição foram implementadas. Em uma delas, uma 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.

Filmes apresentando o comportamento dinâmico do filme líquido no escoamento anular foram preparados no presente trabalho. Estes filmes foram capturados a taxas de aquisição de imagens da ordem de 2000 a 3000 Hz e, quando observados em câmera lenta, revelam aspectos do escoamento ainda não descritos na literatura internacional. Considera-se que estas visualizações sejam uma das mais importantes contribuições do presente trabalho. Recomenda-se ao leitor interessado acessar os vídeos em anexo à versão eletrônica da presente dissertação, disponível na biblioteca digital da PUC-Rio.

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 no escoamento real.

No caso da montagem estereoscópica, foram especialmente desenvolvidos algoritmos computacionais para distorcer as imagens da seção de testes obtidas a partir de cada uma das câmeras montadas em lados opostos do tubo, por onde se dava o escoamento de interesse. Estas câmeras observavam a seção reta do tubo por um ângulo de  $45^\circ$ . Um alvo de calibração posicionado dentro do tubo guiou a geração de polinômios que distorciam as imagens obtidas com as câmeras em ângulo. Estes mesmos polinômios foram posteriormente aplicados às imagens do escoamento, produzindo imagens perfeitamente circulares da seção de testes contendo o filme de líquido.

No caso das medições longitudinais, a aplicação dos algoritmos de processamento das imagens fornecia como resultado registros da variação da espessura do filme em função do tempo para posições axiais previamente definidas. Estes registros foram processados para produzir informações relevantes para o estudo do escoamento anular, tais como, valor médio e valor *RMS* da espessura de filme, espectro de frequência dos sinais de espessura e histogramas das distribuições de espessura do filme. Os resultados medidos para a espessura de filme em duas posições axiais pré-determinadas foram correlacionados para determinar a velocidade de propagação das ondas de líquido. Também foram produzidos mapas espaço-tempo onde a topografia das ondas pode ser claramente observada, possibilitando estudos sobre a interação de ondas de diferentes amplitudes.

A técnica de medição desenvolvida foi testada por um programa de ensaios englobando diversas combinações das velocidades superficiais de líquido e gás, para dois diâmetros de tubo, 15,8 e 50,8 mm. Os resultados obtidos foram comparados com resultados da literatura medidos com outras técnicas experimentais. O nível de concordância obtido das principais tendências de variação das propriedades medidas, em relação aos parâmetros globais do escoamento, com trabalhos encontrados na literatura, foi considerado muito bom.

A técnica de medição estereoscópica desenvolvida não foi exaustivamente testada como a técnica longitudinal. Não uniformidades na iluminação da seção reta do tubo produziram algumas zonas de sombra nas imagens do filme de líquido. Estas não uniformidades dificultaram a detecção da posição da interface do filme em algumas posições angulares. Apesar disso, em posições onde a iluminação era considerada satisfatória, os resultados da técnica estereoscópica foram comparados com as medições da técnica longitudinal, apresentando excelente concordância. Um novo sistema óptico foi projetado para solucionar os problemas de não uniformidade de iluminação, mas não ficou disponível para ser testado antes da conclusão da presente dissertação.

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. Esta característica pode ser bastante útil para auxiliar na compreensão da dinâmica do escoamento. A versão estereoscópica da técnica fornece informações ricas sobre a estrutura instantânea do filme de líquido na seção transversal do tubo que, aparentemente, ainda não estão disponíveis na literatura.

Como ponto negativo das técnicas desenvolvidas pode-se mencionar a necessidade de acesso óptico ao escoamento, o que limita sua aplicação. Também, a necessidade de lasers pulsados de elevada energia e frequência de pulso junto com câmeras de altas taxas de captura de imagens, eleva o custo da técnica, tomando-se como base os preços vigentes no mercado na época da preparação do presente manuscrito.

Deve-se mencionar que, apesar de utilizar técnicas conhecidas como *PLIF* e ajuste de índice de refração entre o fluido e a parede do tubo, a extensão da técnica implementada para sistemas de alta frequência e, principalmente, a

versão estereoscópica da técnica são, de acordo com a pesquisa bibliográfica conduzida, contribuições originais deste trabalho.

O presente trabalho demonstrou a viabilidade da implementação da técnica que combina visualização qualitativa com informações quantitativas sobre escoamento bifásico líquido-gás. Existem diversas possibilidades de aperfeiçoamento e aumento da capacidade de medição da técnica proposta.

A melhoria na resolução espacial e temporal da técnica pode ser obtida pela simples incorporação de novas tecnologias de câmeras digitais e lasers pulsados que são disponibilizados constantemente com maior resolução espacial, maiores taxas de aquisição de imagens, maiores frequências e energia de pulso, a preços cada vez menores.

Além disso, há outras possibilidades que mereceriam estudo, como a utilização simultânea da técnica longitudinal com a estereoscópica, ou a implementação da técnica estereoscópica de duplo plano que, em princípio, forneceria imagens instantâneas da seção reta do filme de líquido em dois planos transversais deslocados axialmente. O processamento adequado destas imagens forneceria informações relevantes sobre o desenvolvimento axial do filme de líquido.