

CARACTERIZAÇÃO DO FILME LÍQUIDO EM ESCOAMENTO ANULAR HORIZONTAL BIFÁSICO AR-ÁGUA EMPREGANDO TÉCNICAS ÓPTICAS

Aluno: Bruno Dreux

Orientador: Luiz Fernando Alzuguir Azevedo

Introdução

Nas últimas décadas, foram realizados diversos estudos sobre escoamento bifásico líquido-gás em regime anular, o que é indicativo da relevância e complexidade deste padrão de escoamento. Este tipo de escoamento está presente em diversas atividades industriais, como, por exemplo, em reatores nucleares, evaporadores, condensadores e em dutos de processos químicos [1].

No padrão anular a fase líquida é transportada sob forma de um filme revestindo a parede do tubo, e também sob forma de gotículas entranhadas no núcleo gasoso. Sendo este padrão caracterizado por altas vazões mássicas de gás, o escoamento da fase gasosa no centro do tubo é turbulento para a maioria das situações encontradas na prática. No filme líquido, devido ao forte cisalhamento na interface decorrente do escoamento do gás, observamos a presença de perturbações em sua estrutura. As perturbações podem ser de dois tipos. A primeira consiste de pequenas perturbações, *ripples*, cujas características principais são a baixa amplitude e alta frequência. A segunda é caracterizada por grandes perturbações, *disturbance waves*, que possuem grandes amplitudes, além de se apresentarem com uma frequência menor [7].

Uma das principais questões ainda não resolvidas sobre escoamento bifásico horizontal em regime anular está relacionada ao mecanismo físico responsável pela formação da fina camada de líquido na parte superior interna do tubo.

Medições do filme líquido foram realizadas, para escoamentos verticais e horizontais durante muitos anos. Espessura de filme líquido em função do tempo, velocidade e frequência de onda são os focos dos trabalhos. Esses estudos empregaram probe resistivo [4] e [5] e, mais recentemente técnicas óticas de visualização [8].

A motivação do presente trabalho foi inicialmente o estudo do escoamento anular para detecção de soluções para corrosão e desgaste acelerado em tubulações. Esses problemas foram observados mais especificamente em dutos de refinarias de hidrocarboneto onde existem obstáculos como cordões de solda, obstruções e curvas.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma técnica de visualização longitudinal para caracterização do escoamento bifásico horizontal ar-água em regime anular que fornecesse também informações quantitativas sobre o filme de líquido na parte inferior do tubo.

Experimento

Foram construídas duas seções de testes, com diâmetros internos de 15,8 mm e 50,8 mm e comprimentos de 3,5 m e 11 m, respectivamente. A primeira foi usada para validar a técnica, e a segunda possui um diâmetro que se aproxima mais dos usados na indústria. A água com Rhodamina B e ar à temperatura ambiente e pressão atmosférica foram usados como fluidos de trabalho.

As seções de testes eram compostas por um sistema de circulação de ar e água. O ar proveniente de um compressor radial, controlado por um inversor de frequência, passava por um rotâmetro para medição da vazão e era conduzido para a tubulação. Água era bombeada para dentro da tubulação por uma bomba de cavidades progressivas, e um rotâmetro era

utilizado para a medição da vazão de líquido. Água e ar entram na tubulação por um misturador na forma de “T”. Os dois fluidos escoavam por toda a seção de testes, desenvolvendo o padrão de escoamento anular. Ao fim do tubo, a mistura era encaminhada para um tanque separador. A água era conduzida de volta ao circuito para ser reaproveitada. O sistema permitia a operação do escoamento do ar em circuito aberto para evitar o aquecimento do fluido.

Uma visão esquemática de uma das seções de testes pode ser vista na Figura 1. Nesta figura, as setas verdes representam o caminho percorrido pelo ar, e as azuis o caminho percorrido pela água.

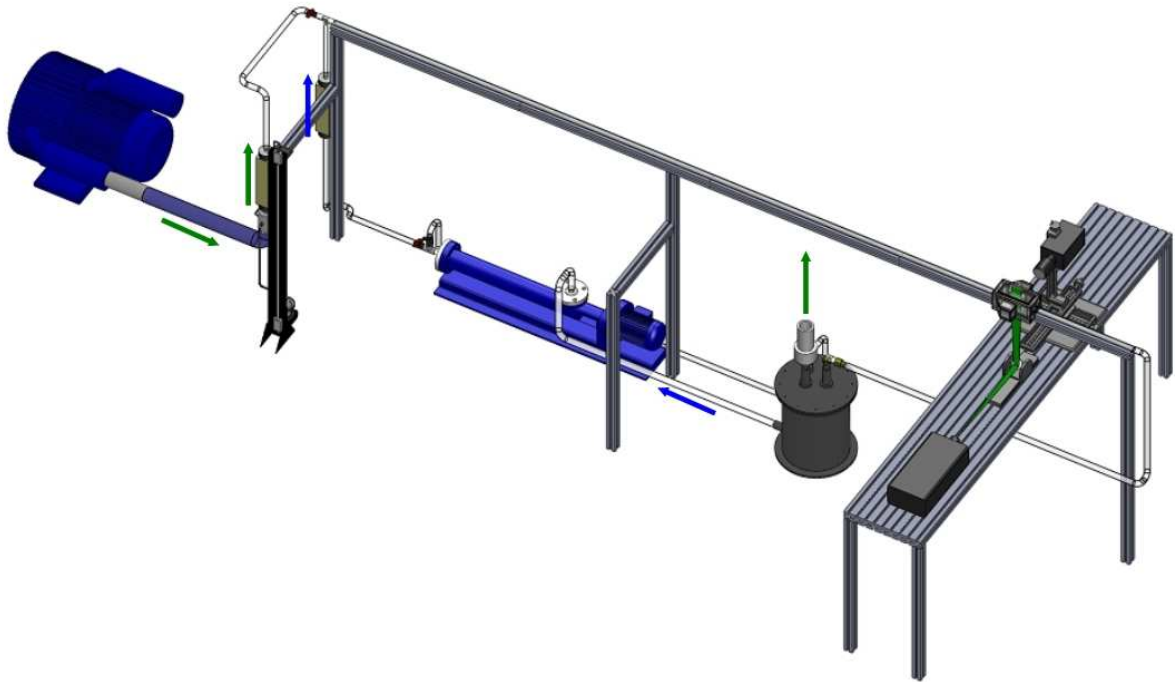


Figura 1 – Visão geral da seção de testes

A técnica PLIF – *Planar Laser Induced Fluorescence* – foi selecionada para a visualização. Trata-se de uma técnica que utiliza a iluminação do escoamento por um plano de laser monocromático, e baseia-se no princípio de fluorescência [6].

Esta técnica é utilizada para visualização de escoamentos e para definição de formas e regimes. É utilizada uma substância fluorescente, Rhodamina B, que ao ser iluminada pela luz verde do laser com comprimento de onda de 527 nm, emite luz em um comprimento de onda superior. Para evitar a presença de luz verde refletida na interface água-ar gerando problemas de visualização e para que seja percebida somente a iluminação da fluorescência, é necessária a utilização de um filtro óptico passa alta. O filtro selecionado permitia a passagem de luz com comprimentos de onda superiores que 560 nm bloqueando a iluminação proveniente do espalhamento de luz na interface líquido-gás. A Figura 2 mostra os comprimentos de onda envolvidos na visualização usando a técnica PLIF.

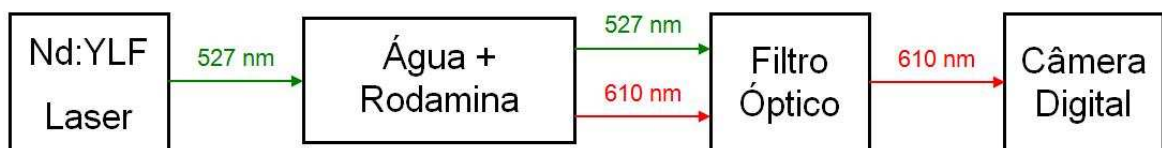


Figura 2 – Comprimentos de onda envolvidos na aplicação da técnica PLIF

Foi usada uma câmera digital de alta velocidade posicionada perpendicularmente à seção de testes. O arranjo óptico montado é ilustrado na Figura 3.

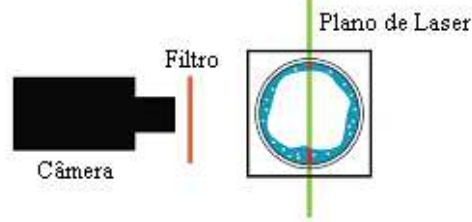


Figura 3 - Visão esquemática do arranjo óptico montado

Para reduzir distorções ópticas geradas por diferentes índices de refração, foi usado um tubo de FEP (*Fluorinated Ethylene Propylene*), um material com um índice de refração muito próximo ao da água [3]. Ao ser inserido numa caixa de visualização cheia de água, o tubo de FEP praticamente desaparece, possibilitando visualizar o escoamento em regiões próximas à parede do tubo.

Foi utilizada uma câmera digital de alta frequência de aquisição, IDT Motion ProX3. Essa câmera era sincronizada com um laser de dupla cavidade e alta taxa de repetição, Nd-YLF (Pegasus PIV New Wave). Cada cavidade do laser produzia pulsos com energia máxima de 10mJ, a uma frequência de 1000 Hz entre pulsos e duração de 5 ns, o que garantia uma intensidade suficiente para induzir a fluorescência. Para sincronizar o pulso do laser com a abertura da câmera foi utilizado o sincronizador digital da TSI, modelo 610032.

O laser emitido pelo sistema é pontual e para a iluminação de um plano do escoamento foi necessária a utilização de lentes cilíndricas e esféricas. A lente cilíndrica, com distância focal de -25 mm determinava a abertura do plano de luz, e a esférica, com distância focal de 500 mm, determinava a espessura do plano de luz. A combinação dessas lentes formava um feixe com espessura de 0.5 mm e uma largura de aproximadamente 40 mm.

Foram realizados diferentes experimentos nas duas seções, com objetivos principais de calcular a espessura de filme e a velocidade de onda. Para cada experimento, foram usadas diferentes configurações de lentes objetivas, resolução e frequência de aquisição, dependendo do dado quantitativo a ser extraído. Essas configurações ideais foram obtidas através de testes prévios realizados. A Tabela 1 mostra os testes realizados.

Tabela 1 - Matriz dos testes realizados

Diâmetro (mm)	Frequência (Hz)	Lente (mm)	Resolução (px)	Tempo (s)	Calibração (px/mm)	Variável Medida
15,8	250	105	512 x 512	52,4	50,00	Espessura
15,8	3000	60	512 x 512	4,4	18,25	Velocidade
50,8	250	60	512 x 512	52,4	21,70	Espessura
50,8	3000	60	1280 x 512	4,4	21,70	Velocidade

Para calcular corretamente a espessura de filme, foi realizada uma calibração, introduzindo um calibrador no tubo, após a retirada da mangueira de retorno. Neste calibrador foi traçada uma grade com espaçamento de 1 mm. Utilizando um software de edição de imagens, e conhecendo o espaçamento entre as linhas da grade, a calibração pixel/mm foi descoberta. Uma imagem do calibrador utilizado pode ser vista na Figura 4.

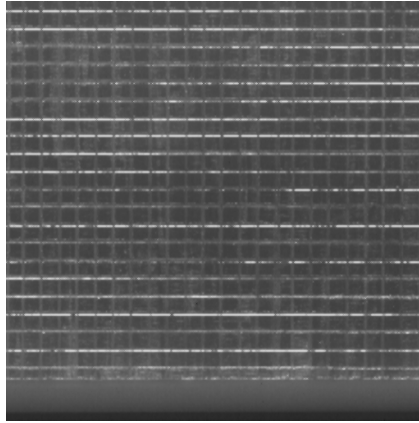


Figura 4 – Imagem do calibrador obtida pela câmera

Após o processo de calibração, a mangueira de retorno era novamente conectada. Antes de capturar imagens do escoamento, o par de vazões ar-água desejado era atingido variando as frequências dos inversores de ar e água e lendo as vazões nos rotâmetros. Quando as vazões atingiam o par desejado, as imagens eram capturadas.

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. Após a binarização das imagens, para determinar a espessura de filme, basta contar o número de pixels com valor lógico 1 a partir da posição da parede do tubo, que é pré-definida pelo usuário.

A espessura de filme foi extraída em duas regiões pré-definidas pelo usuário, chamadas de sondas. A Figura 5 ajuda na definição de sonda. As espessuras de filme medidas nas regiões das sondas 1 e 2 são, respectivamente, $h1(t)$ e $h2(t)$. O tamanho das sondas, $ls1$ e $ls2$, influencia a quantidade de média espacial aplicada nas medidas de espessura de filme. A distância entre as sondas, ds , está relacionada com o cálculo da velocidade de onda através da correlação cruzada do sinal de espessura de filme, que será explicada mais adiante.

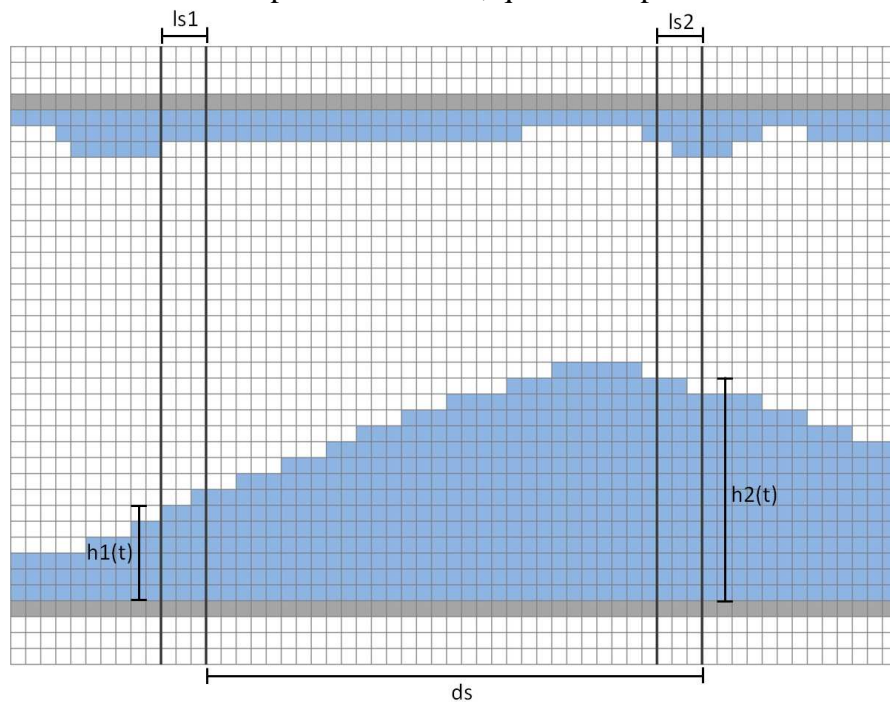


Figura 5 – Definição de sonda

Na Figura 6, há um exemplo de uma imagem original, seguida por suas correspondentes imagens, equalizada e binarizada, além da posição da interface ar-água, calculada pelo programa, em toda a imagem, superposta à imagem original, para validar a técnica.

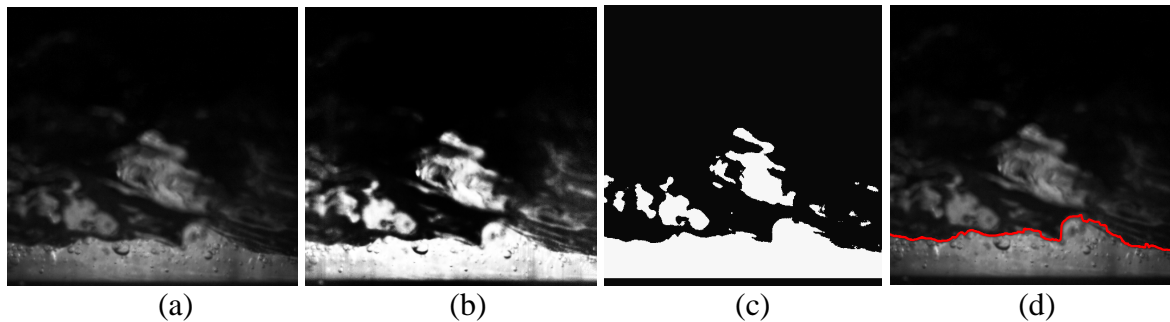


Figura 6 - (a) Imagem original. (b) Imagem equalizada. (c) Imagem binarizada. (d) Interface ar-água calculada superposta à imagem original

Resultados

Foram estudados cerca de 15 pares de vazões ar-água para cada seção, todos dentro do padrão de escoamento anular [9]. As velocidades superficiais de ar, U_{sg} , e de água, U_{sl} , estudadas, para cada uma das seções, podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 – Pares de velocidades superficiais estudadas

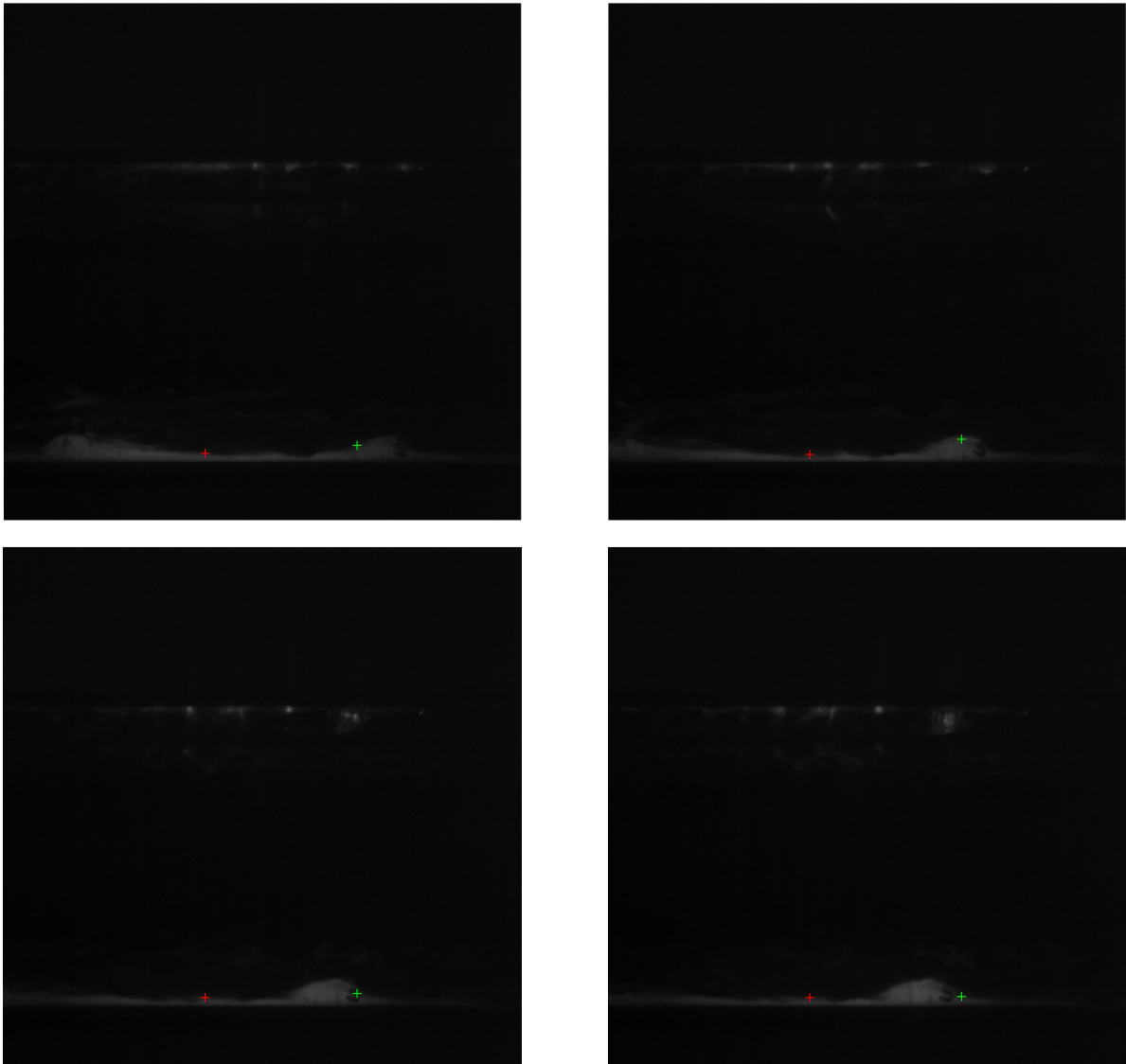
15,8 mm		50,8 mm	
U_{sg} (m/s)	U_{sl} (m/s)	U_{sg} (m/s)	U_{sl} (m/s)
20	0,056	25	0,030
20	0,084	25	0,060
20	0,112	25	0,100
20	0,140	25	0,400
24	0,056	30	0,010
24	0,084	30	0,030
24	0,112	30	0,060
24	0,140	30	0,100
28	0,056	30	0,400
28	0,084	35	0,010
28	0,112	35	0,030
28	0,140	35	0,060
34	0,056	35	0,100
34	0,084	40	0,010
34	0,112		

A partir das imagens obtidas pela técnica, e usando o algoritmo desenvolvido, foram extraídas diversas informações do escoamento, tais como espessura instantânea de filme, espessura média e RMS e velocidade de onda. A velocidade de onda foi calculada a partir da correlação cruzada entre os sinais de espessura de filme extraído das duas sondas axiais. Ao encontrar o pico da correlação, e sabendo a frequência dos experimentos, era calculado o

tempo que uma onda levava para percorrer a distância entre as duas sondas. Como a distância entre essas duas sondas era pré-definida, a velocidade de onda era calculada.

Também foram obtidas propriedades espectrais do escoamento. O espectro de energia das ondas foi obtido através da análise individual do sinal da espessura do filme, utilizando a Transformada de Fourier. Além disso, foram construídos histogramas de probabilidade de ocorrência de picos no filme.

Na Figura 7 são apresentadas algumas imagens capturadas, com as posições da interface ar-água calculadas pelo programa nas regiões das sondas superpostas, para validar a técnica.



(a)

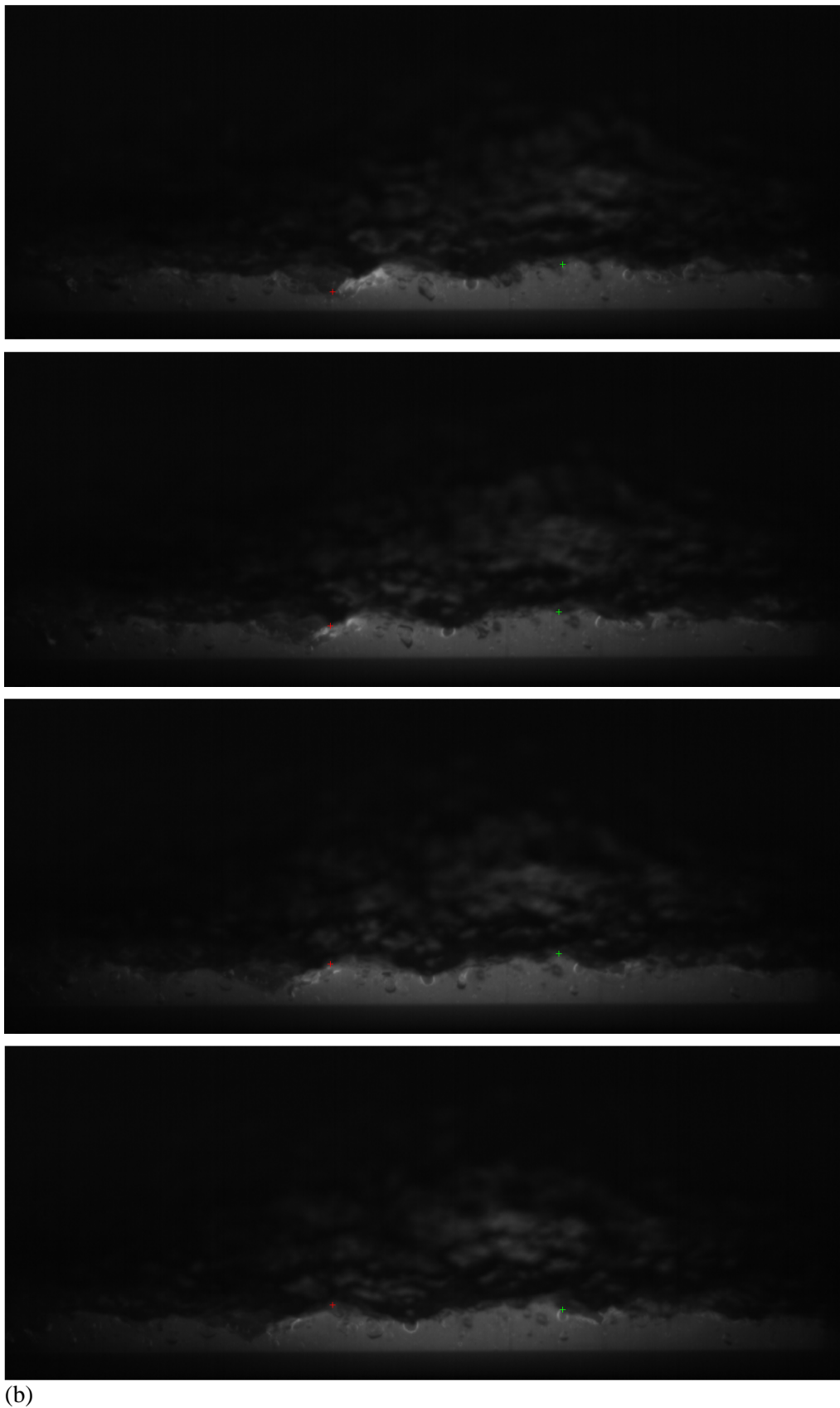


Figura 7 – Exemplo de sequência de imagens capturadas com frequência de aquisição de 3000 Hz e as posições da interface marcada nas sondas para seções de (a) 15,8mm e (b) 50,8mm

Na Figura 8 são mostrados gráficos da espessura de filme em função do tempo para um segundo de escoamento, para a mesma vazão de líquido e vazões crescentes de gás. Analisando esses gráficos, é perceptível que, com o aumento da vazão de gás o filme tende a ser mais uniforme, com menos grandes ondas, tendência que já foi observada por outros autores [4] e [5].

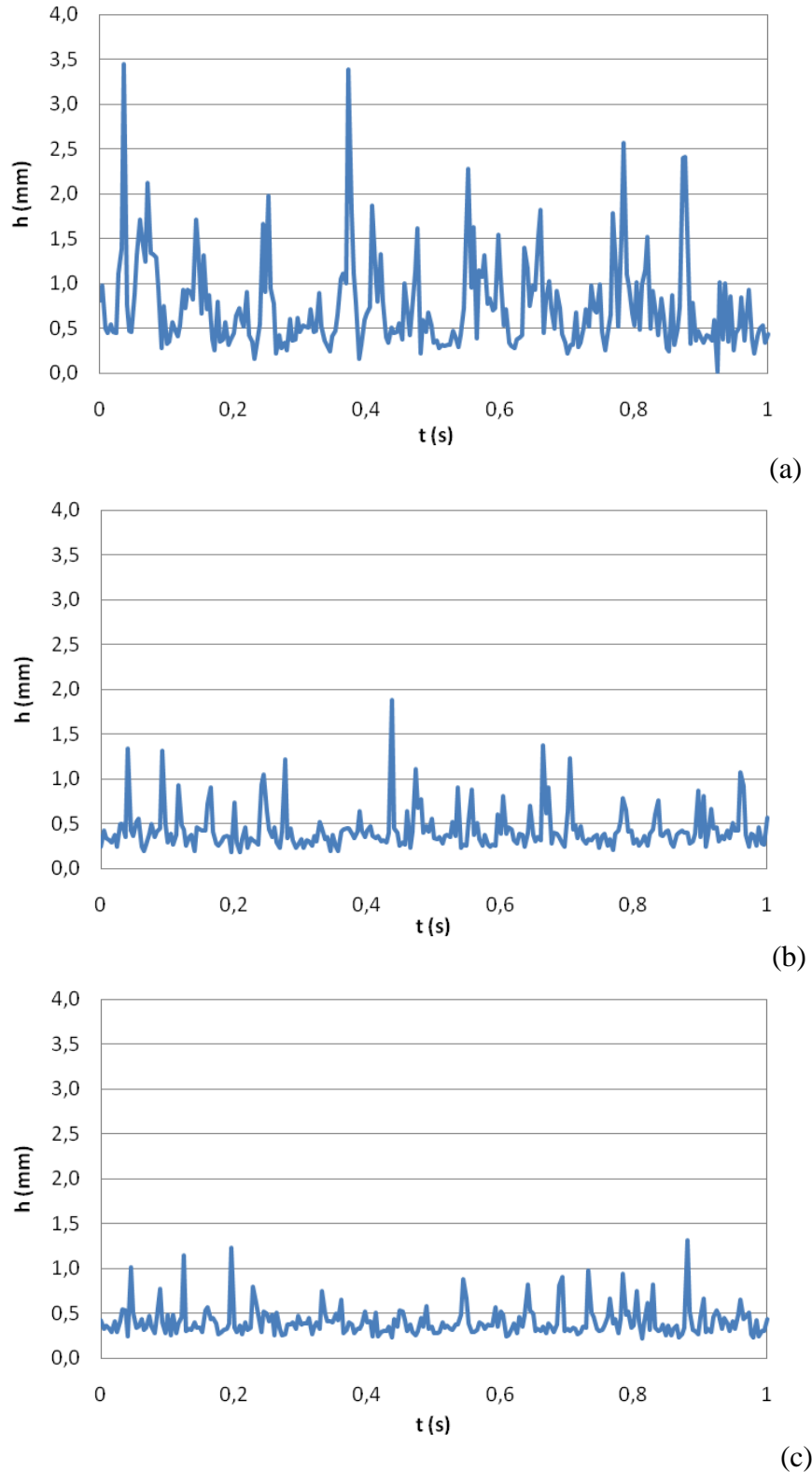


Figura 8 - Espessura de filme em função do tempo para $u_{sl}=0.112$ m/s e velocidades superficiais de gás (a) - $u_{sg}=20$ m/s (b) $u_{sg}=28$ m/s (c) $u_{sg}=34$ m/s.

A Figura 9 apresenta gráficos 3D de espessura de filme em função do tempo e da posição na janela de visualização. Nesta figura, é possível perceber a presença de grandes *disturbance waves*, como a grande onda em vermelho e pequenos *ripples*, que são ondulações de menores amplitudes e maiores frequências. Estas pequenas ondulações estão presentes em todo o escoamento, inclusive em cima das grandes ondas.

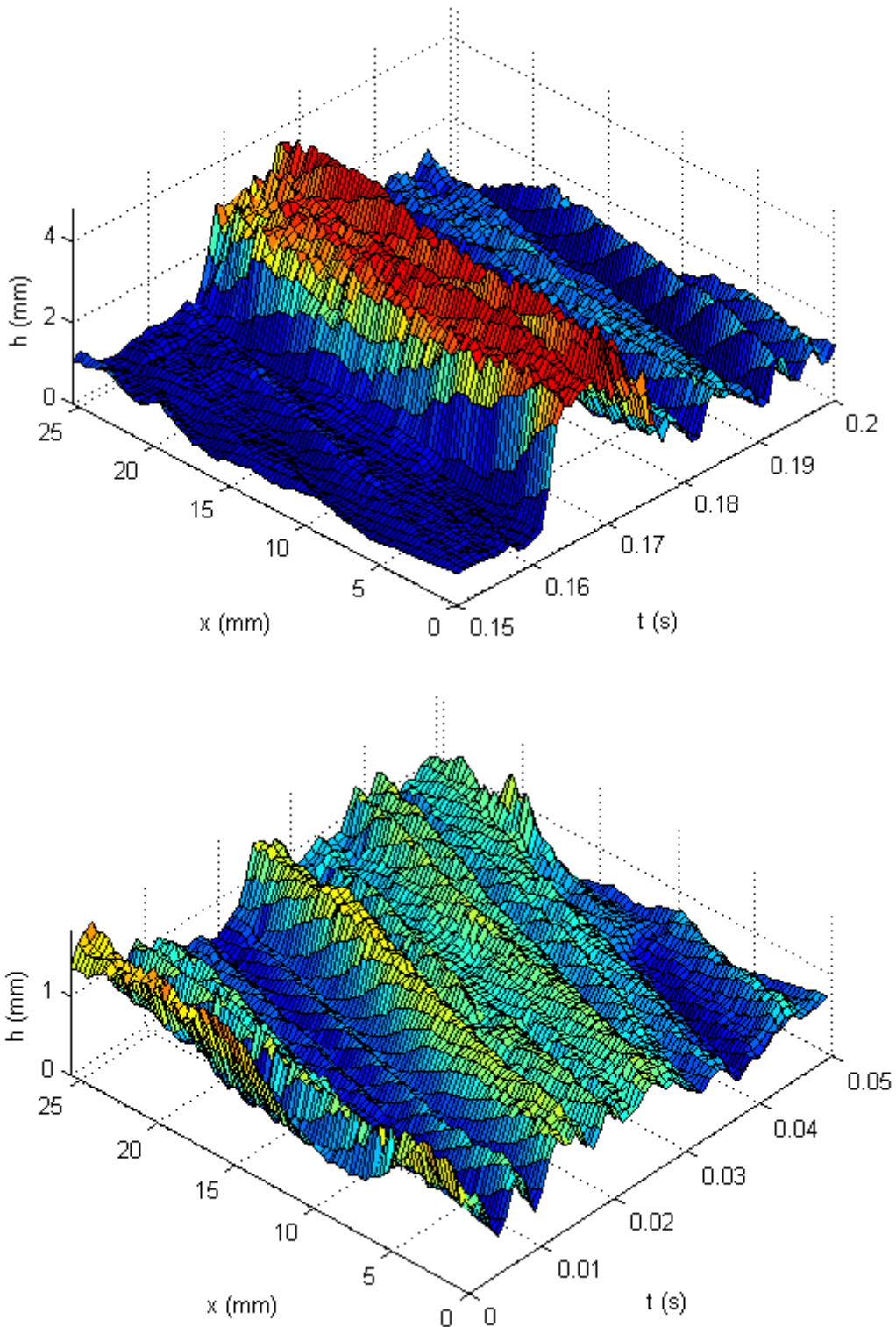


Figura 9 – Gráficos 3D de espessura de filme em função do tempo e da posição na janela de visualização

Os gráficos da Figura 10 e Figura 11 mostram a espessura média de filme em função da velocidade superficial de líquido, U_{sl} , para as diferentes vazões de gás estudadas, para as seções de testes de 15,8 e 50,8 mm, respectivamente. Foi observada uma tendência de redução da espessura de filme líquido com o aumento da velocidade superficial de gás e uma dependência pouco significativa com a variação da velocidade superficial de líquido. Esta tendência nos resultados foi observada por outros autores [4] e [5].

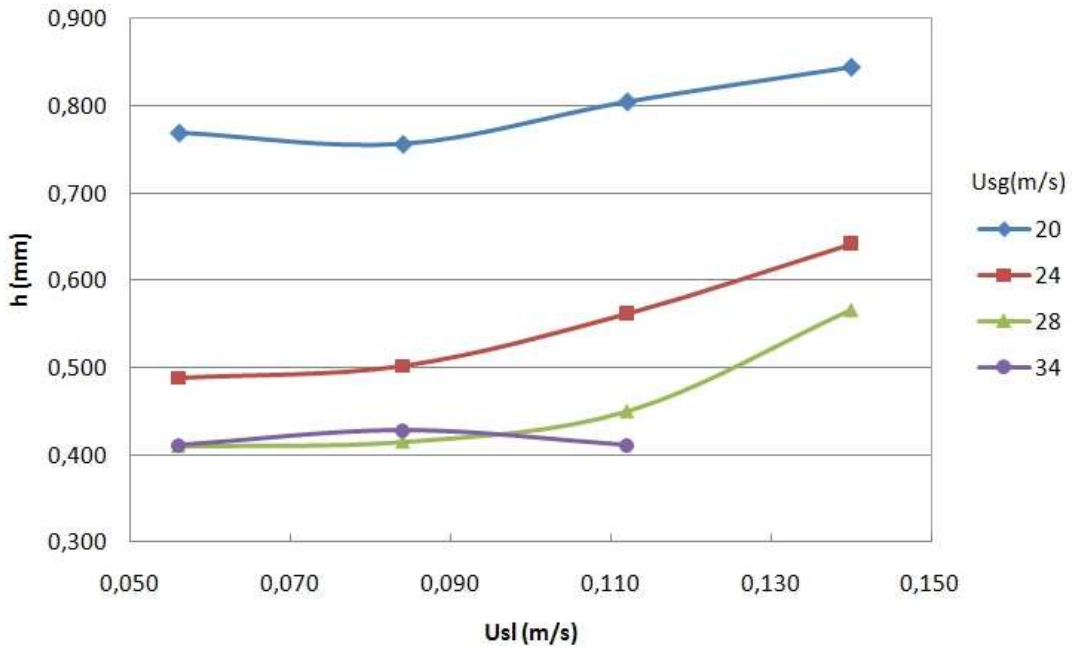


Figura 10 – Gráfico de h médio em função da velocidade superficial de líquido, U_{sl} , para diferentes vazões de gás, U_{sg} , para a seção de 15,8 mm de diâmetro interno

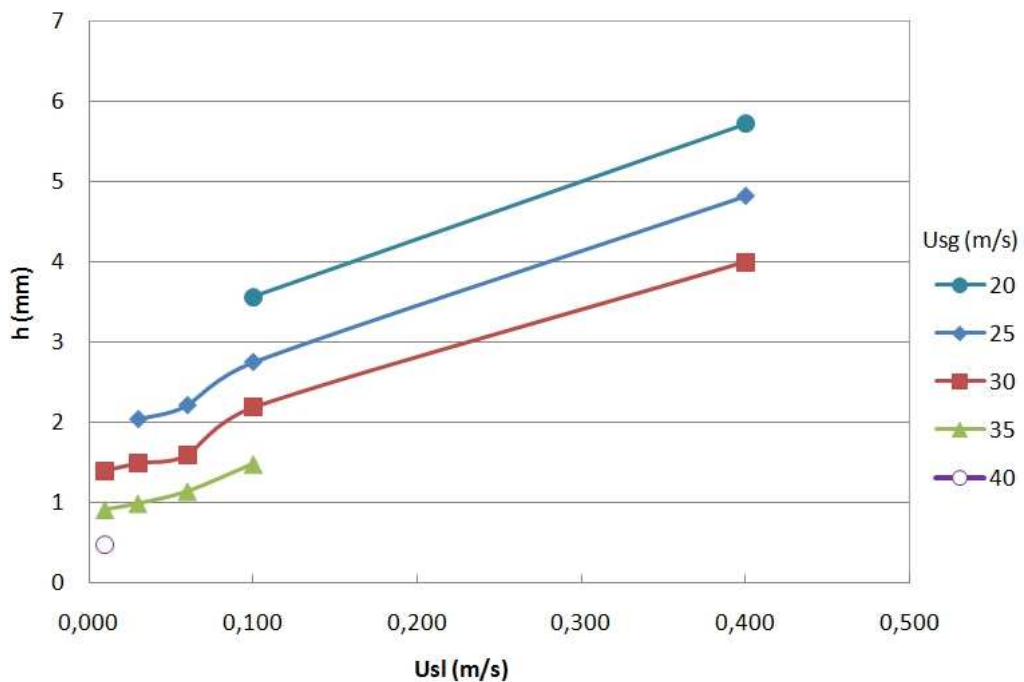


Figura 11 - Gráfico de h médio em função da velocidade superficial de líquido, U_{sl} , para diferentes vazões de gás, U_{sg} , para a seção de 50,8 mm de diâmetro interno

Os gráficos da Figura 12 e Figura 13 apresentam a velocidade média de onda em função da velocidade superficial de líquido, U_{sl} , para as diferentes velocidades superficiais de gás, U_{sg} , para as seções de 15,8 e 50,8 mm de diâmetro interno. Os resultados de velocidade encontrados estão de acordo com os encontrados por outros autores [2] e [7].

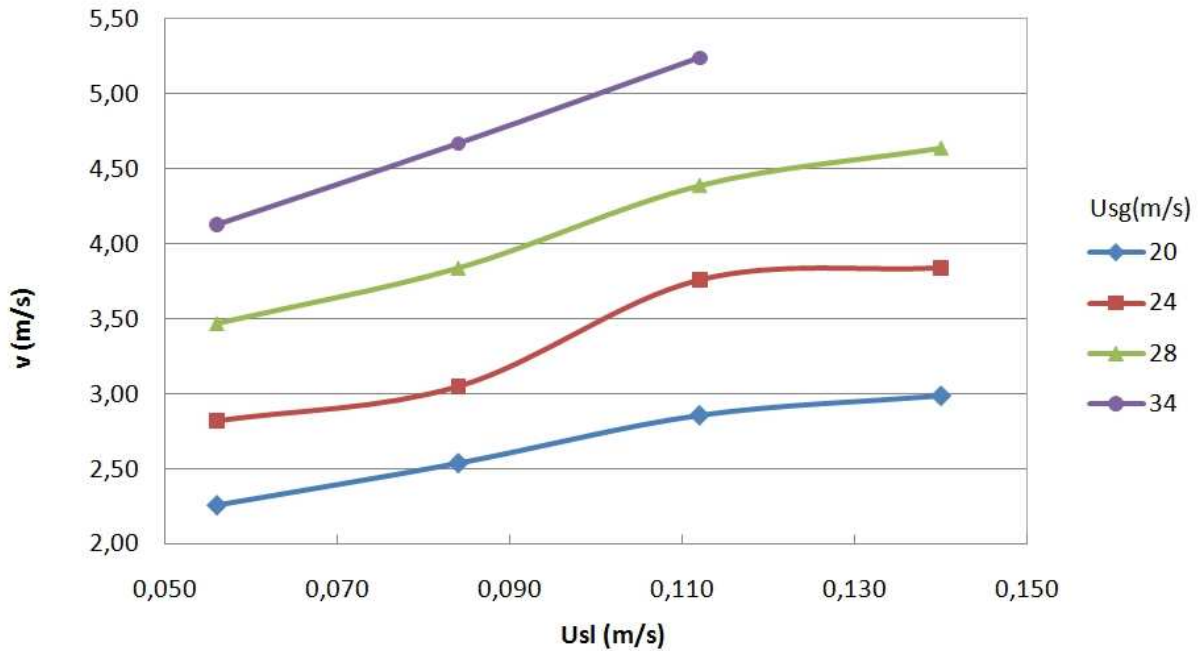


Figura 12 – Gráfico de velocidade média em função das velocidades superficiais de líquido e gás para a seção de 15,8 mm de diâmetro interno

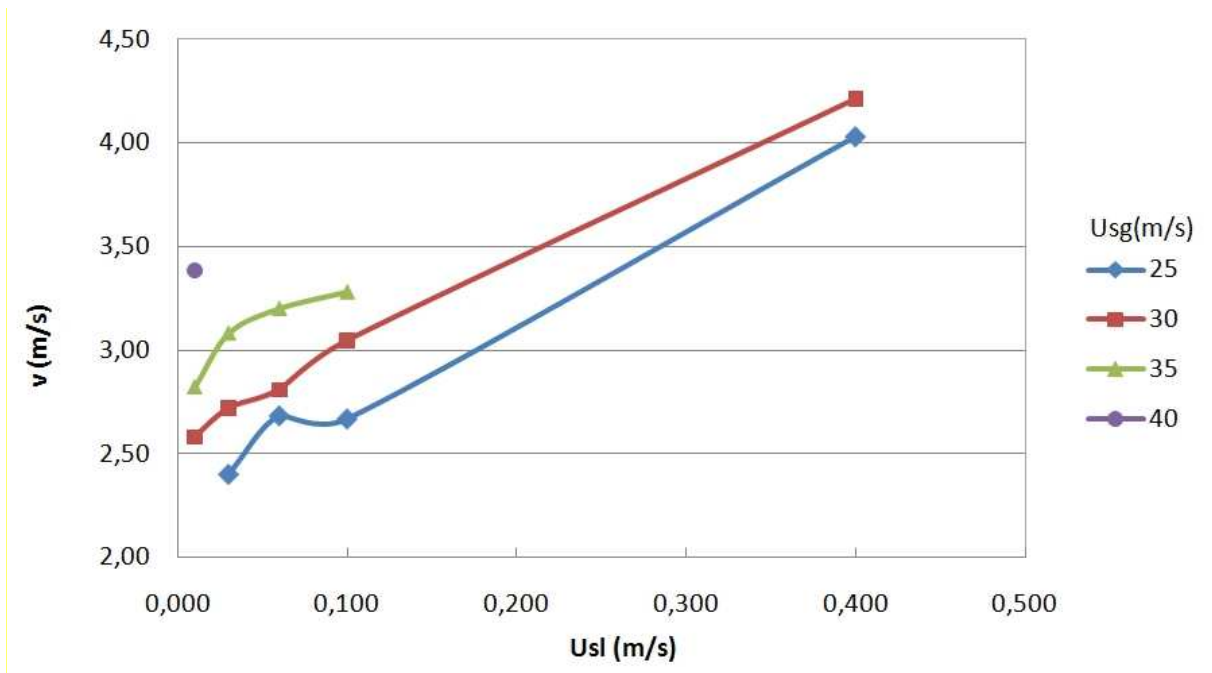


Figura 13 - Gráfico de velocidade média em função das velocidades superficiais de líquido e gás para a seção de 50,8 mm de diâmetro interno

Tabela 3 apresenta os resultados de espessura média de filme e velocidade de onda, para todos os pares de vazões estudados, para as duas seções.

Tabela 3 - Resultados de h médio e velocidade de onda para todas as vazões estudadas para as seções de (a) 15,8 mm e (b) 50,8 mm

U _{sg} (m/s)	U _{sl} (m/s)	h médio (mm)	Velocidade (m/s)
20	0,056	0,77	2,26
20	0,084	0,76	2,54
20	0,112	0,81	2,86
20	0,140	0,85	2,99
24	0,056	0,49	2,82
24	0,084	0,50	3,05
24	0,112	0,56	3,76
24	0,140	0,64	3,84
28	0,056	0,41	3,47
28	0,084	0,42	3,84
28	0,112	0,45	4,39
28	0,140	0,57	4,64
34	0,056	0,41	4,13
34	0,084	0,43	4,67
34	0,112	0,41	5,24

(a)

U _{sg} (m/s)	U _{sl} (m/s)	h médio (mm)	Velocidade (m/s)
25	0,030	2,04	2,40
25	0,060	2,21	2,68
25	0,100	2,75	2,67
25	0,400	4,82	4,03
30	0,010	1,40	2,58
30	0,030	1,49	2,72
30	0,060	1,59	2,81
30	0,100	2,19	3,05
30	0,400	4,00	4,21
35	0,010	0,91	2,82
35	0,030	0,99	3,08
35	0,060	1,14	3,20
35	0,100	1,48	3,28
40	0,010	0,48	3,39

(b)

Os gráficos mostrados na Figura 14 e Figura 15 apresentam as densidades do espectro de frequência da espessura de filme em função do tempo para as respectivas velocidades superficiais de gás $U_{sg} = 20$ m/s e $U_{sg} = 28$ m/s, para as diferentes velocidades superficiais de líquido. Esta figura mostra a influência da velocidade superficial de líquido na distribuição das frequências da variação temporal da espessura de filme. Os picos do PSD indicam a frequência dominante da espessura de filme em função do tempo e possuem uma dependência fraca da velocidade superficial de líquido para as baixas vazões de gás apresentadas na Figura 14. Com o aumento da velocidade superficial de gás, Figura 15, as frequências dominantes aumentam com a velocidade superficial de líquido. Essa tendência, embora seja contrária à encontrada por [4] Jayanti et al. (1990) e [5] Paras e Karabelas (1991), está de acordo com os resultados de [7] Schubring e Shedd (2008). O espalhamento vertical das curvas de PSD para maiores velocidades superficiais de gás indica que as ondas de filme relacionadas com maiores velocidades superficiais de líquido estão associadas com maiores níveis de energia.

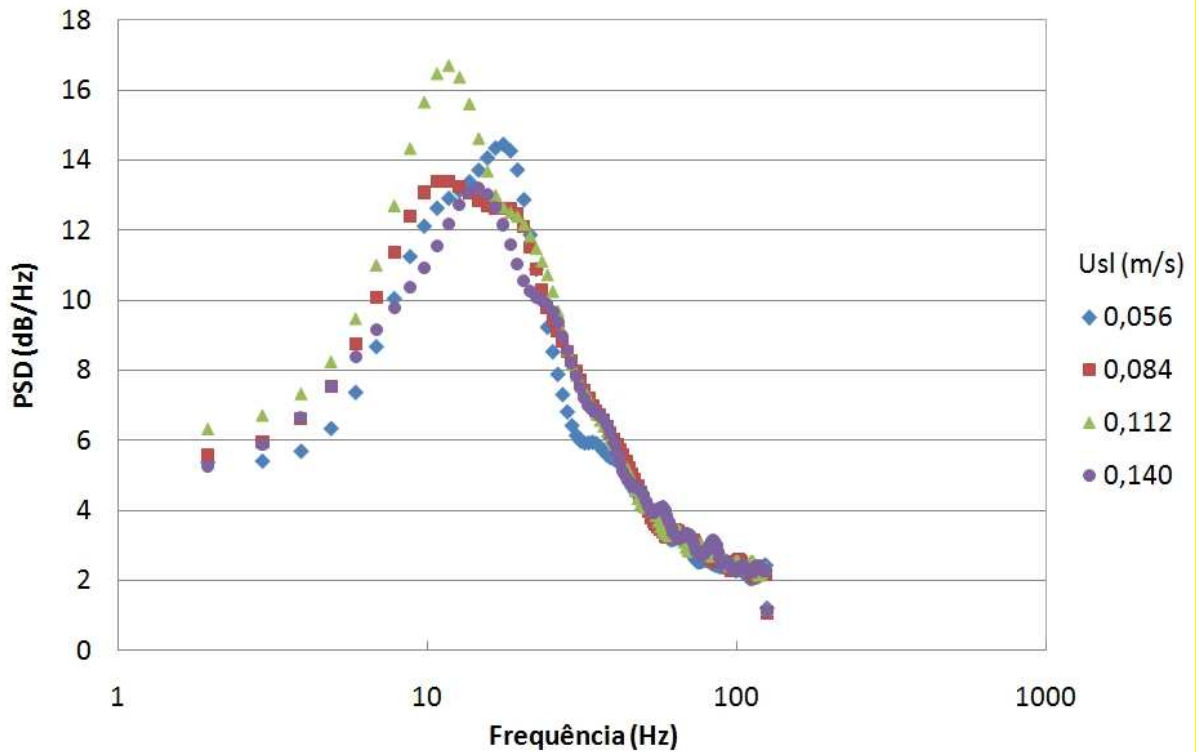


Figura 14 – Gráfico de PSD do sinal de espessura de filme para $U_{sg} = 20$ m/s

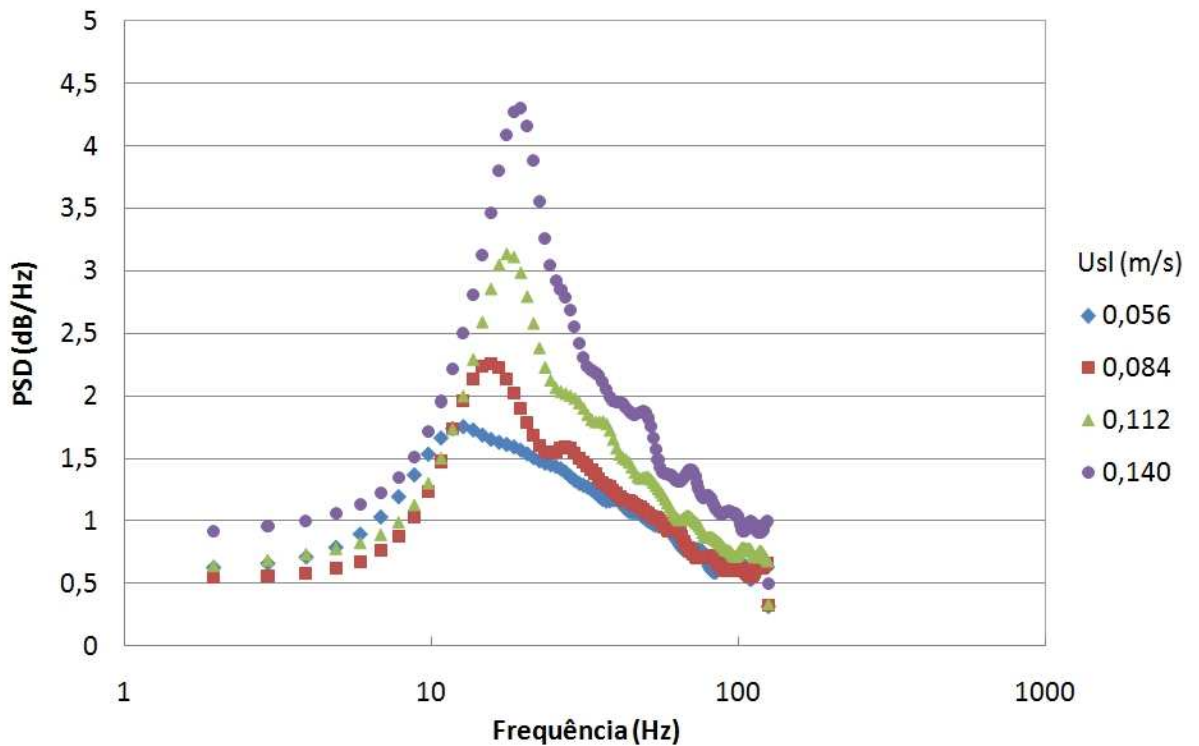


Figura 15 - Gráfico de PSD do sinal de espessura de filme para $U_{sg} = 28$ m/s

Os gráficos apresentados na Figura 16 e na Figura 17 mostram a influência da velocidade superficial de gás no PSD da espessura de filme em função do tempo, para dois valores da velocidade superficial de líquido, 0,084 m/s e 0,112 m/s, respectivamente. A influência da velocidade superficial de gás é significativa para as duas vazões de líquido. Um aumento na

frequência dominante com o aumento da velocidade superficial de gás é claramente observado para as duas vazões superficiais de líquido, uma tendência que também foi observada por outros autores [4] e [5].

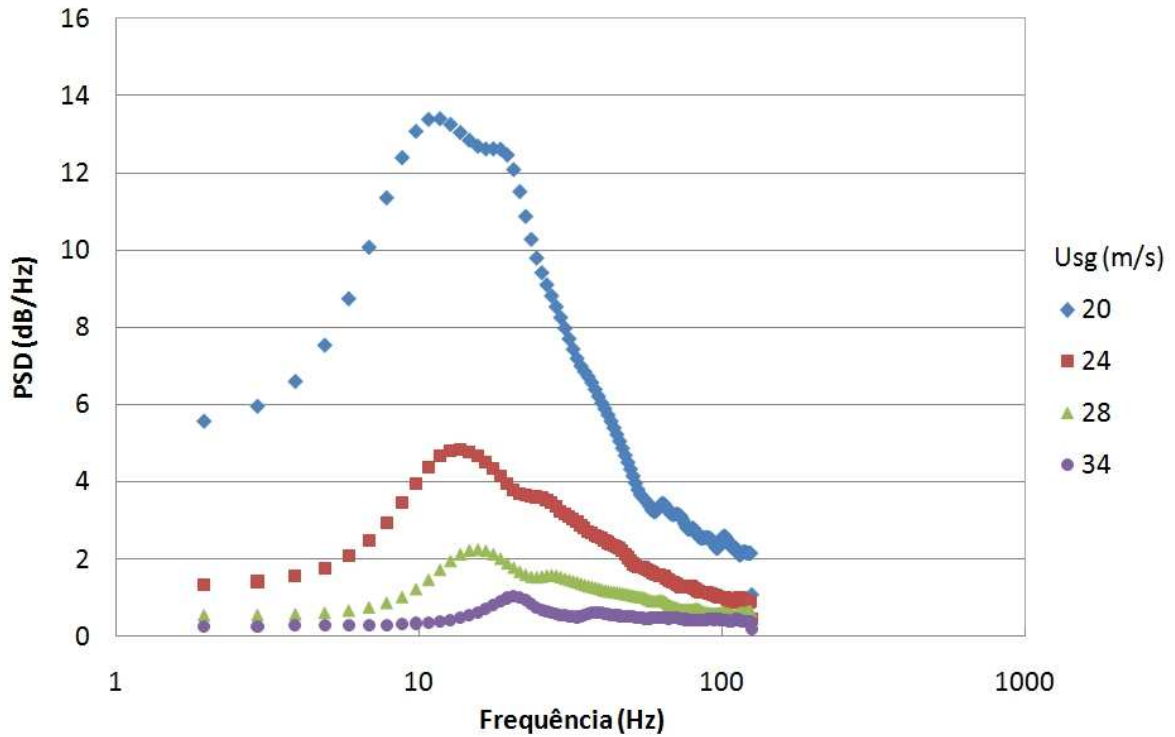


Figura 16 - Gráfico de PSD do sinal de espessura de filme para $U_{sl} = 0,084$ m/s

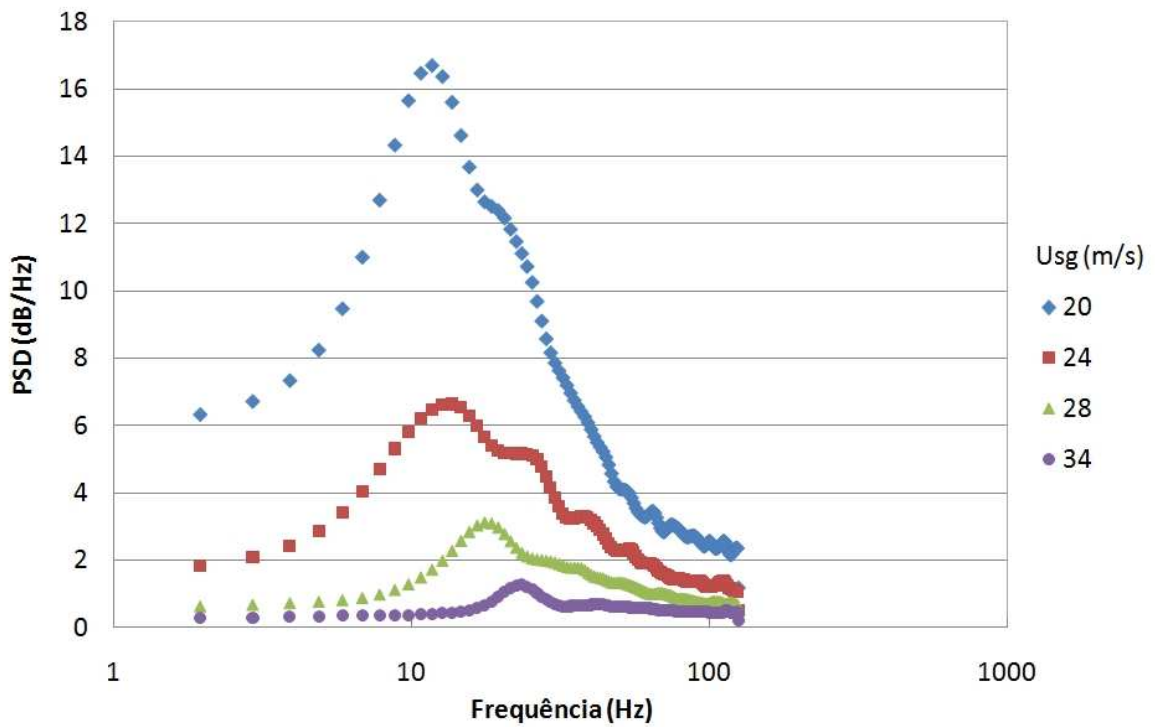


Figura 17 - Gráfico de PSD do sinal de espessura de filme para $U_{sl} = 0,112$ m/s

Os dados de espessura de filme em função do tempo podem ser usados para construir histogramas da probabilidade de ocorrência dos picos de diferentes espessuras. A Figura 18 mostra um destes histogramas para a velocidade superficial de ar igual a $U_{sg} = 20$ m/s e para diferentes velocidades superficiais de água. Como pode ser visto na figura, para este valor de velocidade superficial de gás, não há um efeito significativo da vazão de líquido na distribuição da espessura de filme, com a maioria das espessuras concentradas na faixa de 0,5 a 1,5 mm.

O efeito da velocidade superficial de gás na distribuição de espessura de filme é visto na Figura 19, um histograma de espessura de filme para $U_{sl} = 0,112$ m/s e para diferentes velocidades superficiais do gás. Observando a figura, é claro observar que a distribuição muda significativamente com o aumento da velocidade superficial de gás de 20 para 24 m/s. A partir de 24 m/s, a maioria dos valores de espessura estão agrupados na faixa de 0,5 mm, o que é um indicativo do efeito de regularização que o gás impõe nas ondas de filme líquido.

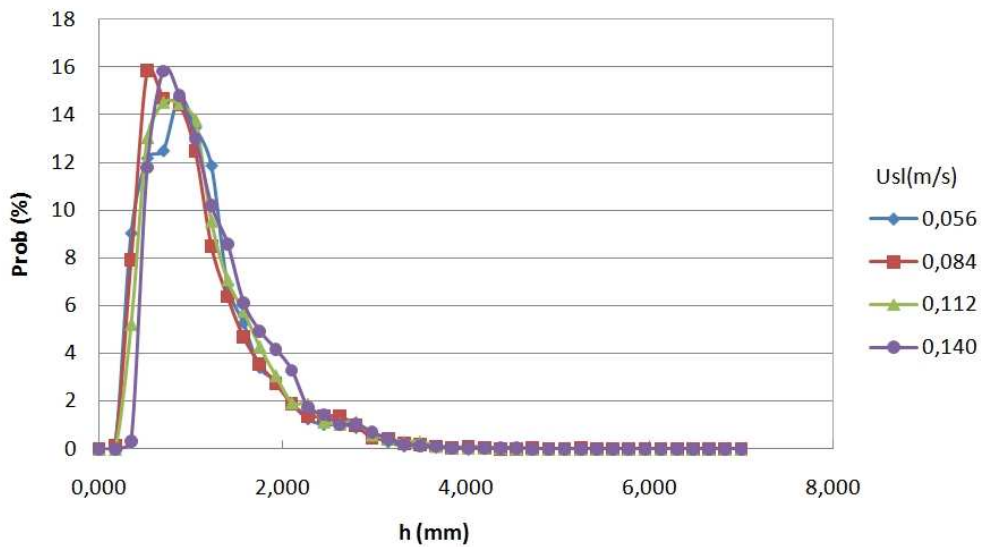


Figura 18 – Histograma da probabilidade de ocorrência de picos no filme para $U_{sg} = 20$ m/s

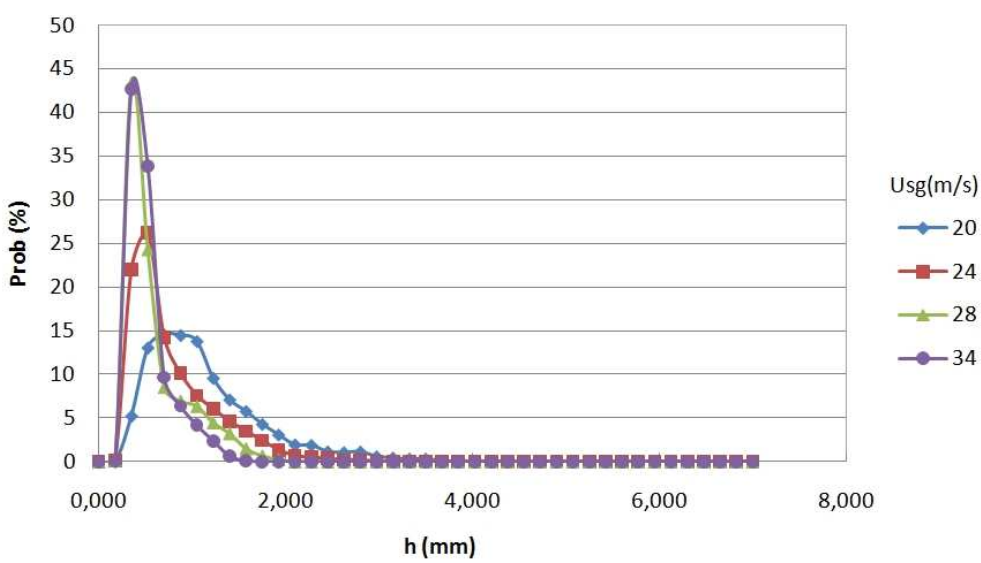


Figura 19 – Histograma da probabilidade de ocorrência de picos no filme para $U_{sl} = 0,112$ m/s

Conclusões

Foi desenvolvida uma técnica óptica de medição que extrai informações estatísticas e propriedades espectrais da espessura de filme líquido em função do tempo em escoamentos anulares horizontais. A técnica, que se baseia em outras descritas na literatura, usa a técnica óptica PLIF para gerar informações qualitativas e quantitativas sobre este tipo de escoamento.

Dois tipos de experimentos foram conduzidos: a 250 Hz, para extração de espessura de filme, e a 3000 Hz, para extração da velocidade de onda.

Foram desenvolvidos algoritmos de processamento para aumentar o contraste, calibrar e extrair as informações desejadas a partir das imagens capturadas. Entre os dados obtidos estão espessura de filme em função do tempo, espessura média e RMS, velocidade de onda e densidade do espectro de frequências dos dados de espessura.

A influência das velocidades superficiais de gás e líquido nessas grandezas foi identificada e comparada com dados da literatura, obtidos usando diferentes técnicas. A concordância obtida foi boa, validando a técnica desenvolvida. Para concluir, a técnica apresentada pode contribuir para entender melhor as dinâmicas dos escoamentos bifásicos em regime anular, por proporcionar a visualização do escoamento e a extração de informações quantitativas.

Referências

1. Bai, D.D.J., Chen, K.P., Renardy, Y.Y., 1997, “Core-Annular Flows”, **Annual Review of Fluid Mechanics**, Vol.29, pp. 65-90.
2. Fukano, T. & Inatomi, T. Analysis of liquid film formation in a horizontal annular flow by DNS. **Int. J. Multiphase Flow**, Vol. 29, 2003.
3. Hewitt, G. F., Jayanti, S. & Hope, C. B. Structure of thin Liquid films in Gas-Liquid Horizontal Flow. **Int.J.Multiphase Flow**, Vol. 16, 1990.
4. Jayanti, S., Hewitt, G. F. & White, S. P. Time-Dependent Behaviour of The Liquid Film in Horizontal Annular Flow. **Int. J. Multiphase Flow**, Vol. 16, 1990.
5. Paras, S. V. & Karabelas, A. J. Properties of the liquid layer in horizontal annular flow. **Int. J. Multiphase Flow**, Vol. 17, 1991.
6. 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.
7. Schubring, D. & Shedd, T.A. Wave behavior in horizontal annular air-water flow. **International Journal of Multiphase Flow**. Vol. 34, 2008.
8. Shedd, T. A. & Newell, T.A. Automated optical liquid film thickness measurement method. **Review of Scientific Instruments**. Vol. 69, 1998.
9. 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.