

8 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados para o escoamento anular horizontal ar-água, obtidos a partir das técnicas implementadas e descritas nos capítulos anteriores do presente trabalho. O objetivo desta apresentação é demonstrar a capacidade de medição da técnica desenvolvida e validá-la através da comparação com resultados disponíveis na literatura.

É importante ressaltar que no método desenvolvido, ao contrário da maioria das técnicas mais tradicionais que utilizam sondas elétricas, cada imagem utilizada para extrair as informações quantitativas do filme líquido, também está disponível para visualização. Esta característica torna esta técnica uma combinação simultânea de visualização qualitativa e quantitativa, o que fornece informações sobre a dinâmica do escoamento ainda não disponíveis na literatura.

Primeiramente, na Seção 8.1, serão apresentados os resultados extraídos a partir da visualização longitudinal do filme. Estes resultados incluem a espessura instantânea e média do filme de líquido, velocidade e espectro de ondas e histograma de espessuras de filme, obtidos para as duas seções de testes construídas com tubulações com diâmetros de 15,8 e 50,8 mm.

A Seção 8.2 apresenta os resultados extraídos a partir da visualização transversal do filme, onde é feita uma comparação com os resultados obtidos pela técnica de visualização longitudinal.

8.1. Medidas Longitudinais do Filme de Líquido

Uma série de experimentos foi realizada para validar as técnicas desenvolvidas no presente trabalho. Estes experimentos cobriram as vazões ar-água descritas na Tabela 8.1 e na Tabela 8.2, respectivamente para os ensaios conduzidos nas seções de testes com 15,8 mm e 50,8 mm de diâmetro interno. De acordo com o mapa de padrões de escoamento de Taitel & Dukler (1976), todos os pares de vazão ar-água estudados encontram-se no regime de escoamento anular, o que pode ser verificado na Figura 8.1 e na Figura 8.2. Nas

tabelas, U_{sg} , U_{sl} , \dot{m}_{sg} , \dot{m}_{sl} representam, respectivamente, as velocidades superficiais de gás e líquido, e as vazões mássicas de gás e líquido.

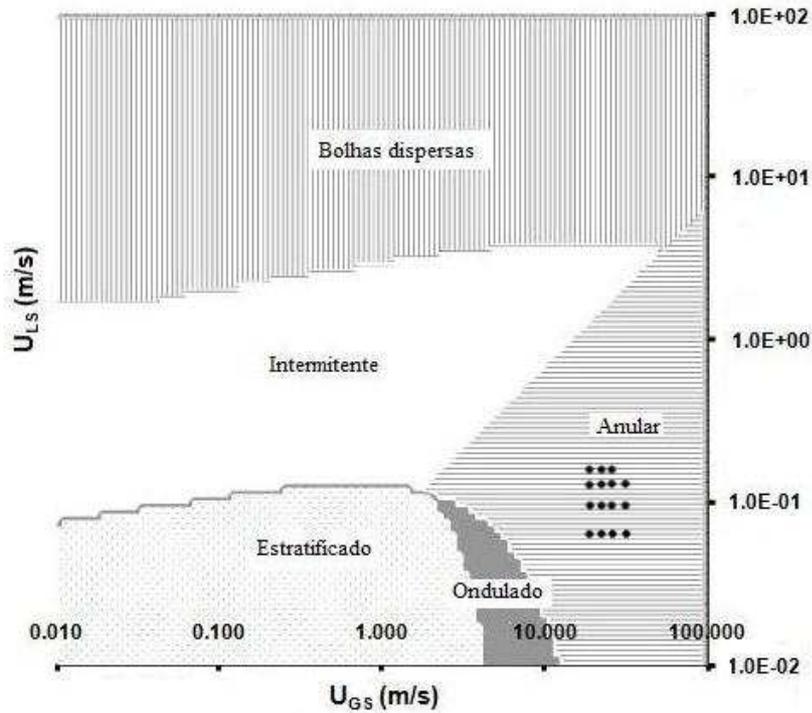


Figura 8.1 - Mapa de padrões de escoamento de Taitel & Dukler (1976), para seção de testes com diâmetro de 15,8 mm, com os pares de vazão ar-água no regime de escoamento anular estudados.

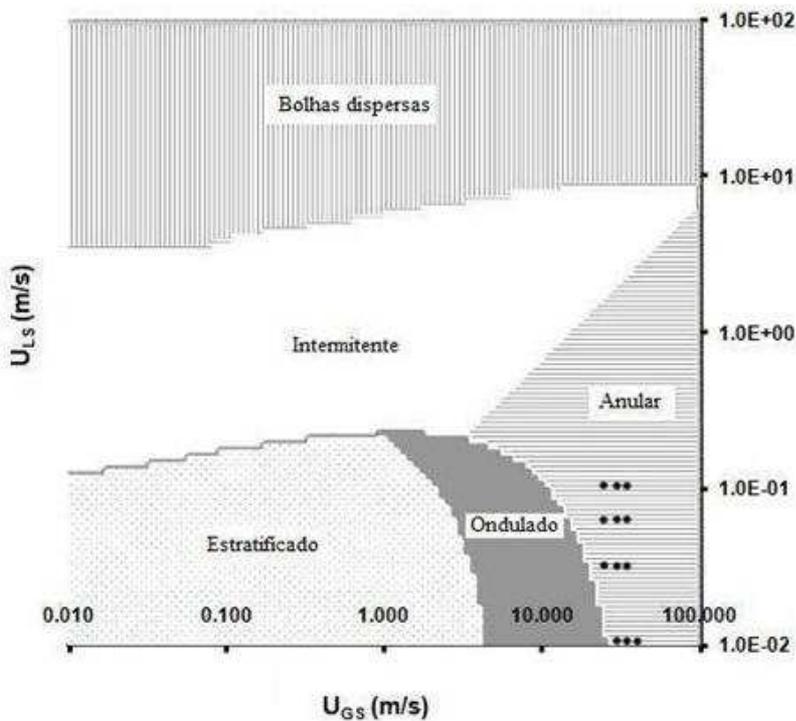


Figura 8.2 - Mapa de padrões de escoamento de Taitel & Dukler (1976), para seção de testes com diâmetro de 50,8 mm, com os pares de vazão ar-água no regime de escoamento anular estudados.

Tabela 8.1 - Matriz de testes conduzidos na seção de 15,8 mm de diâmetro.

U_{sg} (m/s)	\dot{m}_{sg} (kg/s)	U_{sl} (m/s)	\dot{m}_{sl} (kg/s)
20	0,0052	0,056	0,0110
24	0,0067	0,056	0,0110
28	0,0081	0,056	0,0110
34	0,0106	0,056	0,0110
20	0,0054	0,084	0,0165
24	0,0068	0,084	0,0165
28	0,0081	0,084	0,0165
34	0,0114	0,084	0,0165
20	0,0056	0,112	0,0220
24	0,0073	0,112	0,0220
28	0,0091	0,112	0,0220
34	0,0120	0,112	0,0220
20	0,0058	0,140	0,0274
24	0,0075	0,140	0,0274
28	0,0094	0,140	0,0274

Tabela 8.2 - Matriz de testes conduzidos na seção de 50,8 mm de diâmetro.

U_{sg} (m/s)	\dot{m}_{sg} (kg/s)	U_{sl} (m/s)	\dot{m}_{sl} (kg/s)
30	0,0825	0,01	0,0203
35	0,1005	0,01	0,0203
40	0,1188	0,01	0,0203
25	0,0681	0,03	0,0608
30	0,0844	0,03	0,0608
35	0,1019	0,03	0,0608
25	0,0834	0,06	0,1216
30	0,0895	0,06	0,1216
35	0,1056	0,06	0,1216
25	0,0690	0,10	0,2027
30	0,0889	0,10	0,2027
35	0,1097	0,10	0,2027

8.1.1.

Varição Temporal da Espessura de Filme Líquido

Nos testes realizados para visualização e medição longitudinal do filme líquido, 13100 imagens foram capturadas a uma frequência de aquisição de 250 Hz, o que corresponde a um tempo de aquisição de 52 segundos. As imagens adquiridas foram processadas digitalmente com os procedimentos descritos no Capítulo 5, fornecendo a variação temporal da espessura do filme de líquido na geratriz inferior do tubo.

Os gráficos da Figura 8.3 à Figura 8.6 apresentam resultados típicos da variação temporal da espessura do filme líquido inferior, obtidos para quatro ensaios distintos, cada um caracterizado por um par de vazões de líquido e gás. Nas figuras, a espessura do filme em milímetros é apresentada em função do tempo para um valor fixo da velocidade superficial de líquido e quatro diferentes valores da velocidade superficial de gás, todos obtidos na seção de testes com tubo de 15,8 mm. Para que a estrutura das ondas que caracteriza o filme de líquido possa ser melhor apreciada, as figuras apresentam apenas registros correspondendo a 1 segundo de escoamento.

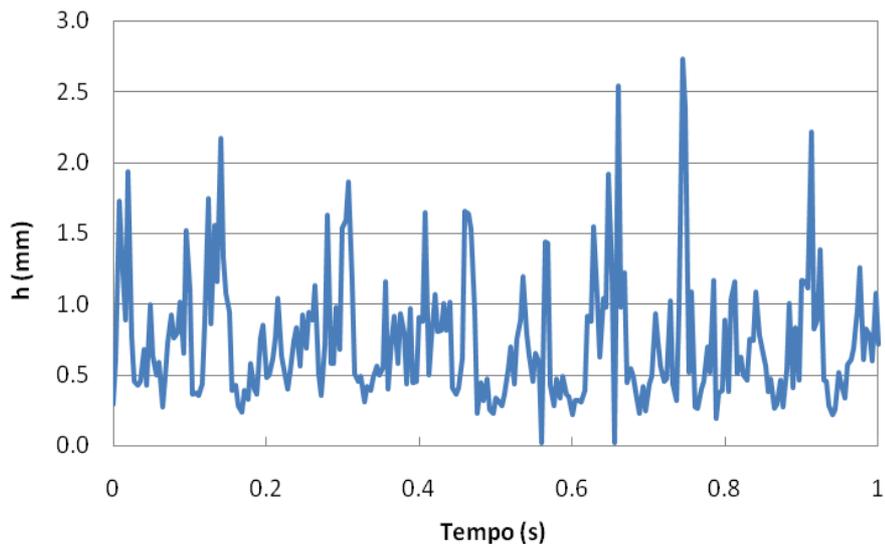


Figura 8.3 - Espessura de filme líquido para $U_{sg} = 20 \text{ m/s}$ e $U_{sl} = 0.056 \text{ m/s}$, para a seção de 15,8 mm de diâmetro.

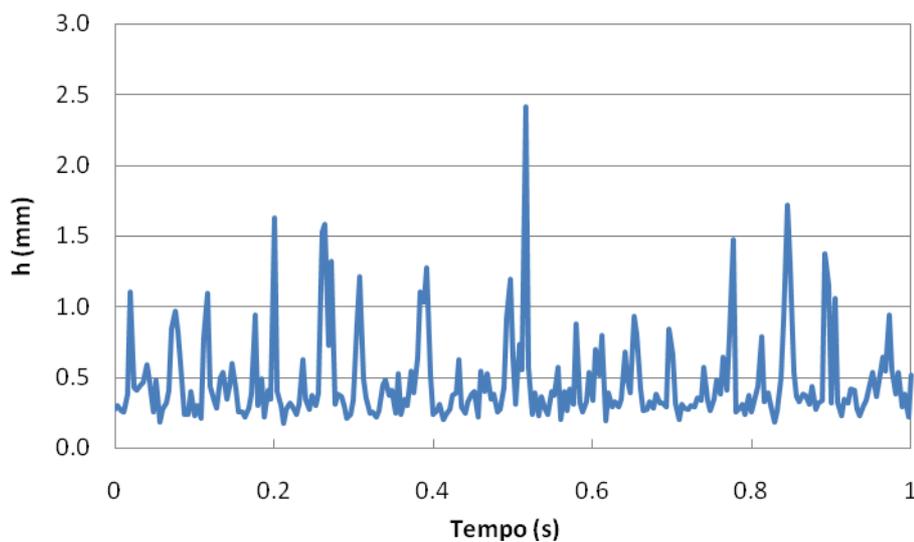


Figura 8.4 - Espessura de filme líquido para $U_{sg} = 24 \text{ m/s}$ e $U_{sl} = 0.056 \text{ m/s}$ para a seção de 15,8 mm de diâmetro.

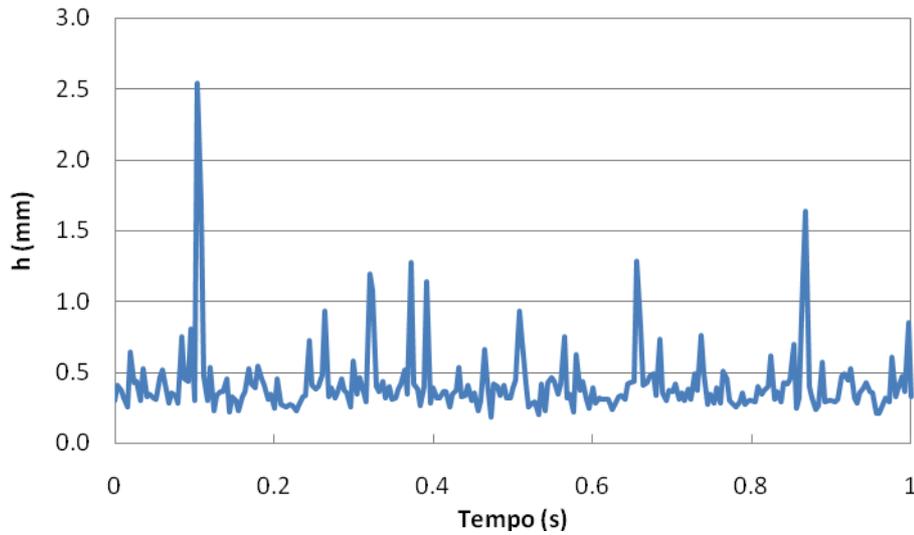


Figura 8.5 - Espessura de filme líquido para $U_{sg} = 28 \text{ m/s}$ e $U_{sl} = 0.056 \text{ m/s}$ para a seção de 15,8 mm.

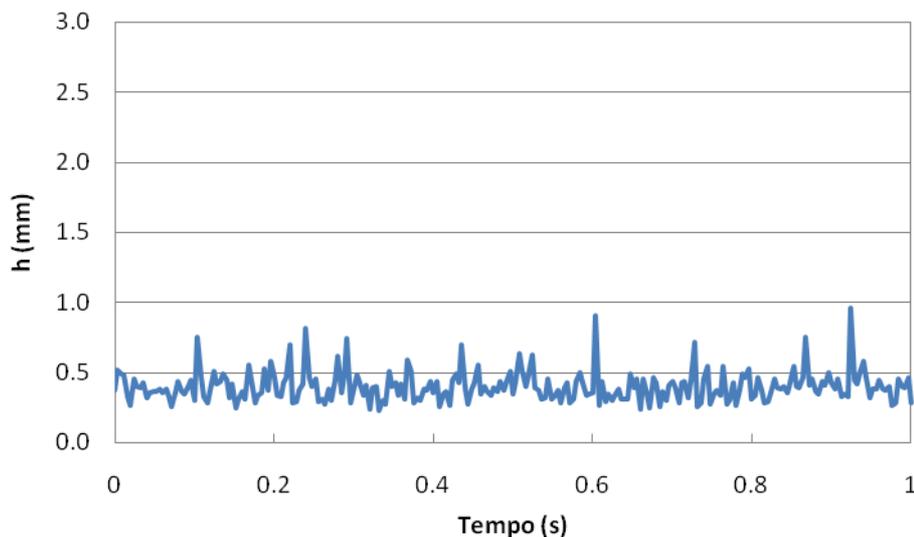


Figura 8.6 - Espessura de filme líquido para $U_{sg} = 34 \text{ m/s}$ e $U_{sl} = 0.056 \text{ m/s}$ para a seção de 15,8 mm.

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.

8.1.2. Espessura Média do Filme de Líquido

Os gráficos da Figura 8.7 à Figura 8.10 apresentam os resultados obtidos que indicam a influência das velocidades superficiais de líquido e gás sobre a espessura média do filme de líquido nas geratrizes inferiores dos tubos das seções de 15,8 e 50,8 mm de diâmetro. A espessura média foi calculada como a média temporal dos registros de espessura instantânea de filme como aqueles apresentados na seção anterior. A espessura média do filme de líquido foi determinada utilizando-se a equação 7.1.

O cálculo de incertezas descrito no Apêndice B revelou que o nível de incerteza relativa na medição da espessura média de filme líquido é inferior a 1%.

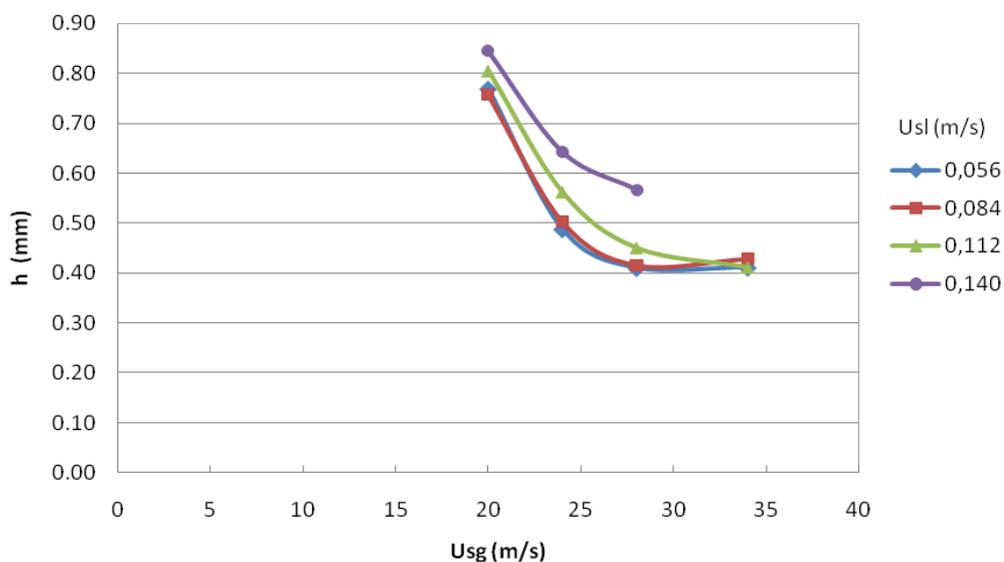


Figura 8.7 - Comportamento da espessura média de filme de líquido para a seção de 15,8 mm em função da velocidade superficial do gás.

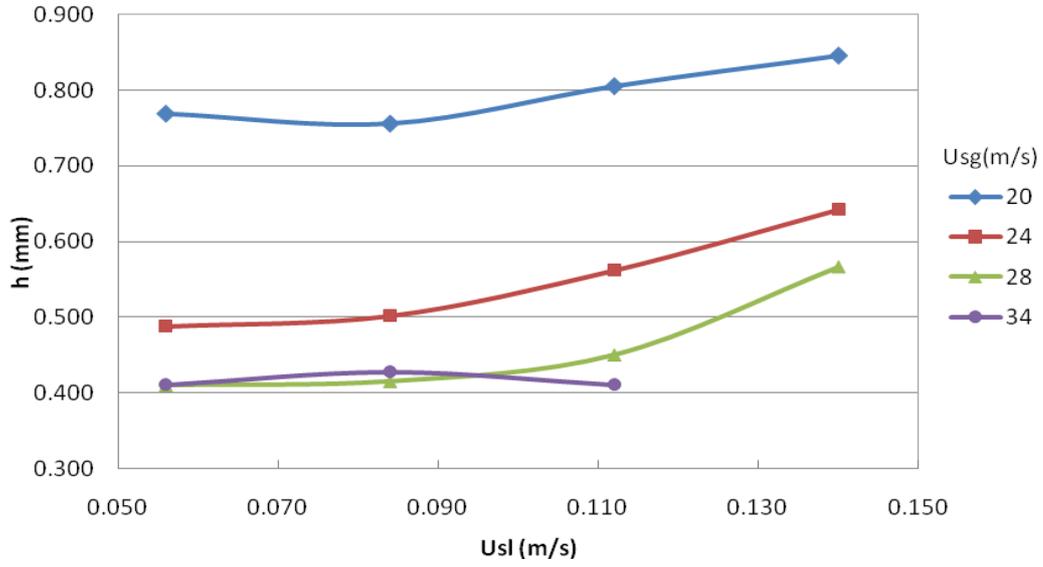


Figura 8.8 - Comportamento da espessura média de filme de líquido para a seção de 15,8 mm em função da velocidade superficial do líquido.

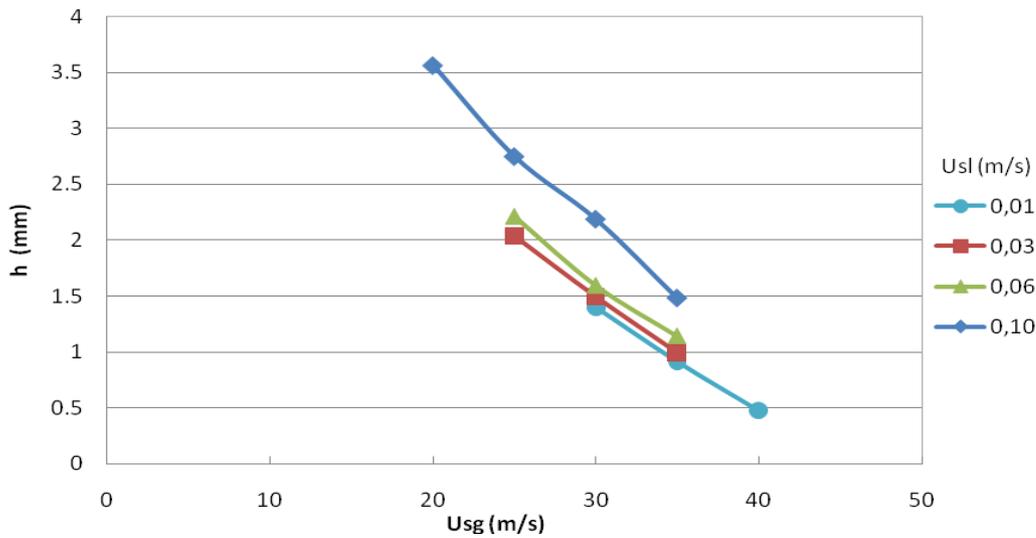


Figura 8.9 - Comportamento da espessura média de filme de líquido para a seção de 50,8 mm em função da velocidade superficial do gás.

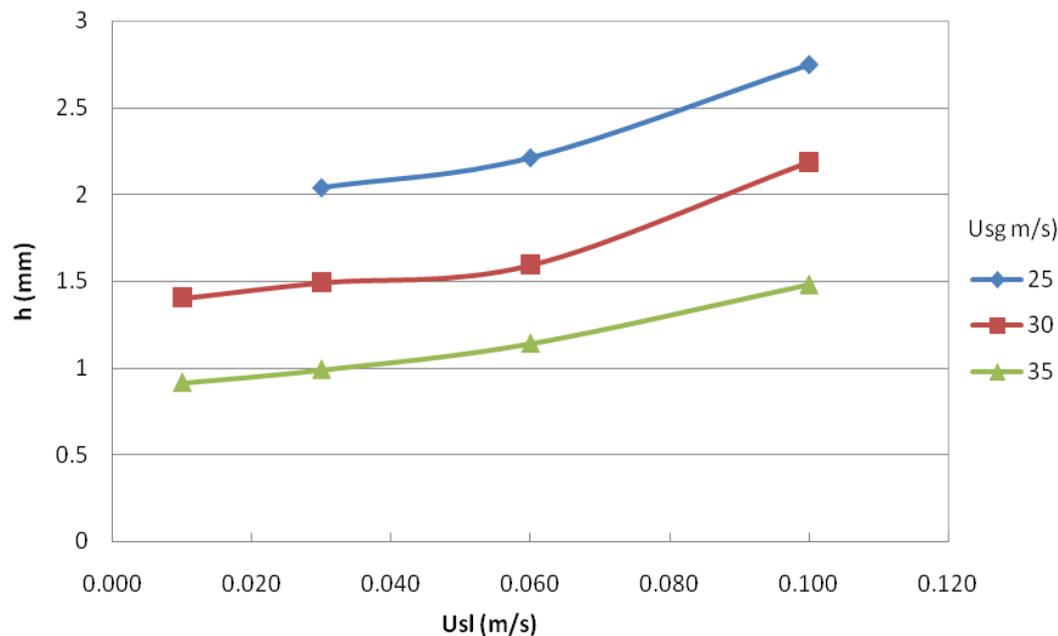


Figura 8.10 - Comportamento da espessura média de filme de líquido para a seção de 50,8 mm em função da velocidade superficial do líquido.

A análise dos resultados apresentados na Figura 8.7 para o tubo de 15,8 mm indica que a espessura média do filme na parte inferior do tubo é uma função decrescente da velocidade superficial de gás, para uma dada velocidade superficial de líquido. Essa tendência está de acordo com resultados já disponíveis na literatura (Schubring & Shedd, 2009a, b, Jayanti et al., 1990 e Paras & Karabelas, 1991). Pode ser ainda observado na figura que a técnica de medição desenvolvida no presente trabalho foi capaz de capturar o comportamento da espessura média do filme que, para todas as velocidades superficiais de líquido estudadas, tem uma redução acentuada na sua taxa de decréscimo para velocidades superficiais do gás acima de valores em torno de 28 m/s. Schubring & Shedd (2009b) observaram esta tendência em seus experimentos com tubos do mesmo diâmetro, e a atribuíram à redistribuição do filme na circunferência do tubo. Estes autores utilizam esta região de insensibilidade da espessura média de filme à vazão de líquido como indicativo da transição entre os sub-padrões de escoamento ondulado-anular para totalmente-anular. Esse comportamento pode ser também associado à uma maior taxa de entranhamento do líquido no núcleo gasoso quando a velocidade superficial do gás é aumentada. A estabilização da espessura de filme para valores da velocidade superficial de gás acima de 28 m/s pode também ser observada na Figura 8.8, que apresenta os mesmos dados em função, agora, da

velocidade de líquido. Nota-se também na forma de apresentação dos dados empregada nesta figura, uma menor sensibilidade da espessura média de filme à velocidade superficial do líquido.

A Figura 8.9 e a Figura 8.10 apresentam os resultados para a espessura média do filme de líquido obtidos para o tubo de 50,8 mm de diâmetro. Também para este diâmetro da seção de testes, observa-se a dependência decrescente da espessura do filme com a velocidade superficial de gás. No entanto, para este diâmetro de tubo a limitação na potência do compressor de ar disponível não permitiu a realização de ensaios com velocidades superficiais de gás acima de 40 m/s, o que impossibilitou que o comportamento de diminuição da taxa de decréscimo da espessura média do filme fosse observado. Paras & Karabelas (1991), utilizando seção de testes também com diâmetro de 50,8 mm, observaram esta tendência da espessura do filme apenas para velocidades superficiais do gás superiores a 50 m/s, valor acima da capacidade de nossas instalações.

A Figura 8.11 e a Figura 8.12 foram preparadas para permitir uma comparação entre os valores medidos para a espessura média de filme inferior de líquido em seção de 50,8 mm de diâmetro obtidos por Paras & Karabelas (1991) e os resultados do presente trabalho. A Figura 8.11 e a Figura 8.12 apresentam a variação da espessura média do filme com a velocidade superficial do gás para velocidades superficiais do líquido iguais a 0,03 e 0,06 m/s, respectivamente. Apesar das faixas de velocidade de gás distintas, os resultados apresentados apontam para uma boa concordância para a menor velocidade superficial de líquido. Para a velocidade superficial de líquido de 0,06 m/s verifica-se uma maior diferença entre os valores medidos nos dois trabalhos. Porém, observa-se para maiores valores de velocidade superficial de gás uma tendência a uma melhor concordância. Seria desejável que outros estudos com faixas de velocidade superficial e diâmetro de tubo semelhante estivessem disponíveis na literatura para permitir determinar qual técnica apresenta resultados mais confiáveis.

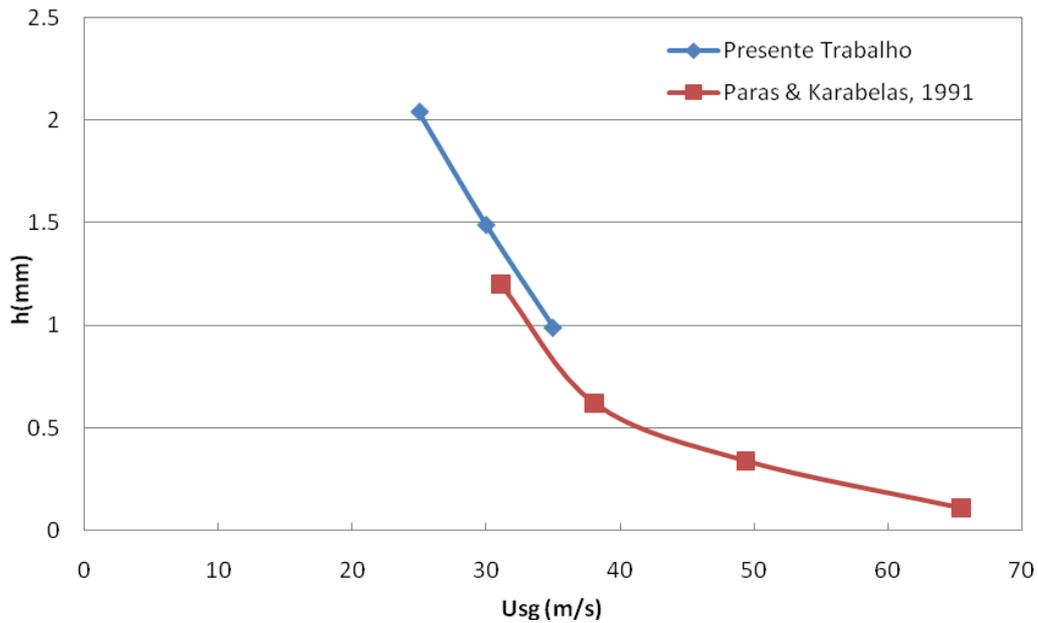


Figura 8.11 - Comparação dos resultados da espessura média de filme líquido inferior entre o presente trabalho e os resultados de Paras & Karabelas (1991) para tudo com 50,8 mm diâmetro e $U_{sl}=0,03$ m/s.

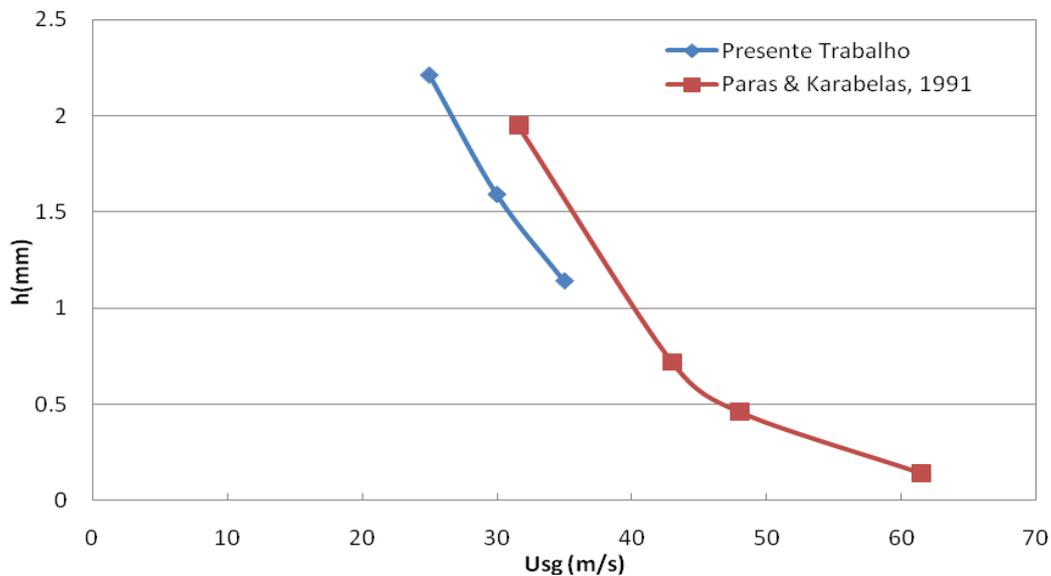


Figura 8.12 - Comparação dos resultados da espessura média de filme líquido inferior entre o presente trabalho e os resultados de Paras & Karabelas (1991) para tudo com 50,8 mm diâmetro e $U_{sl}=0,06$ m/s.

Foi mencionado na Seção 4.1.6.5 que a memória disponível na câmera digital utilizada no registro das imagens utilizadas na extração da espessura do filme de líquido era limitada. Esta limitação poderia vir a introduzir dúvidas com relação à representatividade do valor médio calculado para a espessura de filme.

De fato, um registro por demais curto da variação temporal do filme pode fornecer uma representação distorcida do seu valor médio.

Para avaliar se o período de amostragem obtido com a câmera digital disponível era adequado para a avaliação do valor médio do filme, foram realizados testes auxiliares onde a resolução espacial da câmera digital foi reduzida de 512x512 *pixels* para 512x100 *pixels*. Esta redução permitiu que o período de amostragem das imagens fosse aumentado de 52 para 260 segundos, uma vez que a frequência de captura foi mantida fixa em 250 Hz.

Os valores de espessura média calculados para os dois períodos de amostragem utilizados diferiram de 0,4%, o que indicou que a amostragem de 52 segundos fornece uma boa representação do valor médio da espessura do filme.

A repetibilidade da técnica de medição do valor médio da espessura do filme de líquido foi avaliada pela repetição de 16 ensaios com os mesmos valores nominais das velocidades superficiais do líquido e do gás. O desvio padrão em relação à média encontrado entre as espessuras médias de filme dos 16 casos foi de 2%, o que atesta para a boa repetibilidade dos experimentos realizados.

8.1.3. Média Quadrática da Espessura de Filme Líquido – *RMS*

A média quadrática da espessura do filme de líquido – valor *RMS* – fornece medidas da intensidade das flutuações da espessura de filme que contribuem para a caracterização do escoamento. A Figura 8.13 apresenta a razão entre a espessura *RMS*, h_{RMS} , e a espessura média de filme em função da velocidade superficial de gás, para diferentes valores da velocidade superficial de líquido, obtidos para seção a seção de testes de 15,8 mm. Observa-se na figura que esta razão tem seu máximo em 67%, para as condições correspondentes à menor velocidade superficial de gás (20 m/s) e velocidade superficial de líquido de 0.084 m/s. Nota-se também na figura a forte tendência decrescente da razão h_{RMS}/h com o aumento da velocidade superficial do gás. Por outro lado, a Figura 8.14 mostra que esta razão é pouco sensível à velocidade superficial do líquido. Esses resultados estão de acordo com o trabalho de Paras & Karabelas (1991).

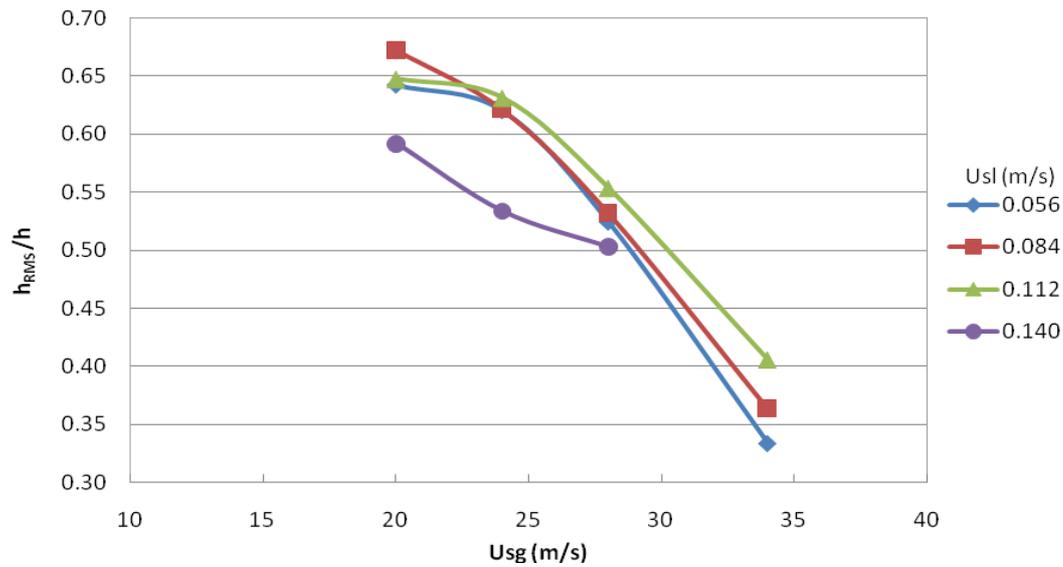


Figura 8.13 - Razão entre a espessura *RMS* e a espessura média de filme em função da velocidade superficial de gás para a seção de 15,8 mm.

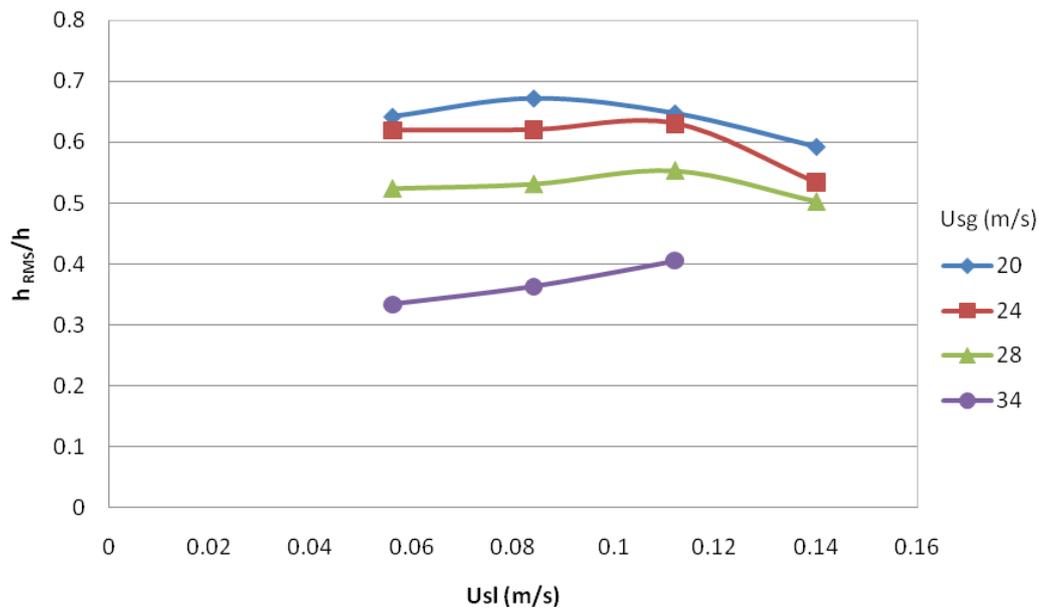


Figura 8.14 - Razão entre a espessura *RMS* e a espessura média de filme em função da velocidade superficial de gás para a seção de 15,8 mm.

8.1.4. Velocidade de Propagação das Ondas de Líquido

Medidas de velocidade de propagação das ondas de líquido foram obtidas pela correlação cruzada dos dados de espessura do filme em função do tempo, medidos nas regiões das sondas 1 e 2, como descrito na Seção 7.3. Em todos

os testes realizados, foi usada uma frequência de aquisição de imagens de 3000 Hz.

O cálculo de incertezas descrito no Apêndice B revelou que o nível de incerteza relativa no cálculo da velocidade de propagação das ondas é inferior a 4%.

Como já mencionado, a espessura de filme líquido em função do tempo e velocidade de onda foram obtidos através de experimentos separados empregando calibração espacial com magnificação óptica e frequência de aquisição diferentes. Para o cálculo da velocidade, verificou-se a necessidade de garantir uma distância axial entre as sondas grande o suficiente para que o número de quadros, correspondente ao atraso da melhor correlação entre os dois sinais, fosse grande o suficiente para não comprometer a incerteza no resultado. As distâncias entre as sondas de medição para cada configuração são apresentadas na Tabela 8.3.

Tabela 8.3 – Distância entre as sondas de medição para cada configuração estudada.

Diâmetro (mm)	Montagem Óptica	Frequência (Hz)	Dist. Sondas (mm)
15,8	Longitudinal	3000	8,2
50,8	Longitudinal	3000	16,1

Deve-se ressaltar que a velocidade de onda obtida pelo método de medição utilizado representa a velocidade de propagação do grupo de ondas caracterizado pelo registro total de imagens capturado, ou seja, não há distinção entre as velocidades características de ondas por faixa de amplitude. Como será apresentado na Seção 8.1.7, medidas instantâneas da espessura do filme de líquido ao longo de toda a extensão de cada imagem (não somente nas regiões das sondas de medição) permitem a determinação de velocidades de propagação de cada onda.

Da Figura 8.15 à Figura 8.18 são apresentados os valores de velocidades de onda obtidos para todos os experimentos realizados, para as duas seções de testes, em função das velocidades superficiais do gás e do líquido. A tendência observada na literatura (Schubring & Shedd, 2008 e Paras & Karabelas, 1991) de aumento da velocidade de propagação das ondas tanto com a velocidade do líquido quanto com a do gás foi também verificada nos resultados obtidos com a técnica desenvolvida.

Para a seção de testes de 50,8 mm de diâmetro foi possível realizar uma comparação quantitativa dos valores obtidos para a velocidade de propagação

de ondas no presente trabalho com aqueles publicados por Paras & Karabelas (1991). Esta comparação é apresentada na Figura 8.19 e na Figura 8.20 para as velocidades superficiais de líquido de 0,03 e 0,06 m/s, respectivamente. A análise das figuras indica que as velocidades medidas no presente trabalho são superiores àquelas reportadas por Paras & Karabelas (1991). Até o presente momento não foi possível encontrar uma explicação que justificasse esta diferença.

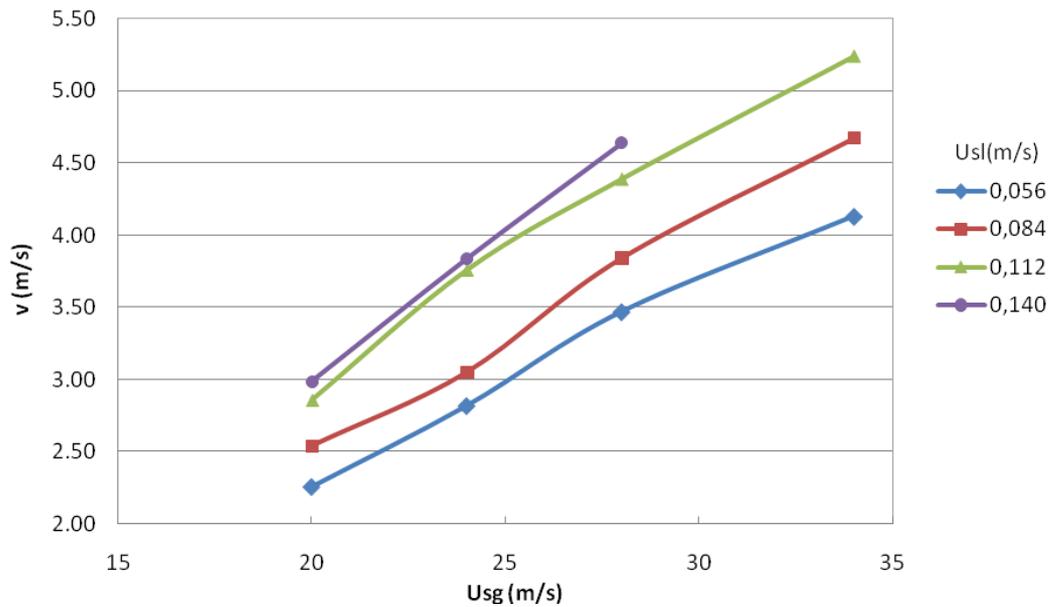


Figura 8.15 - Variação da velocidade de onda com a velocidade superficial de gás para a seção de 15,8 mm.

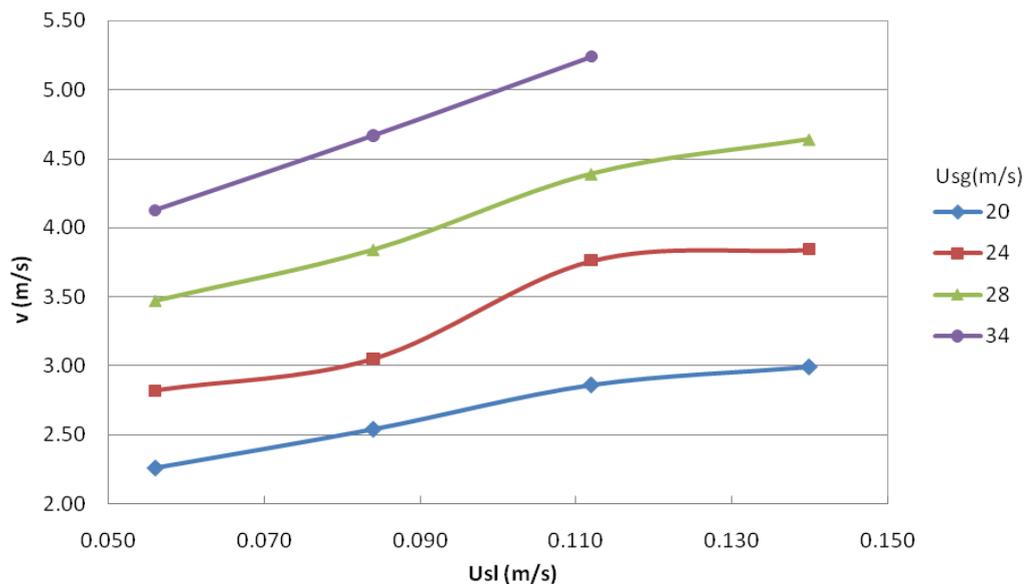


Figura 8.16 - Variação da velocidade de onda com a velocidade superficial do líquido para a seção de 15,8 mm.

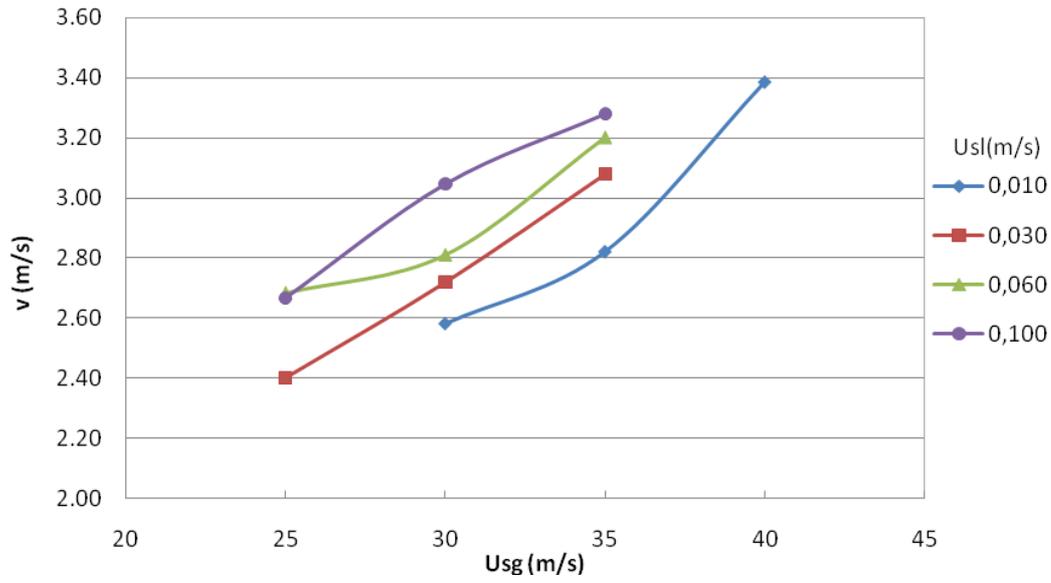


Figura 8.17 - Variação da velocidade de onda com a velocidade superficial de gás para a seção de 50,8 mm.

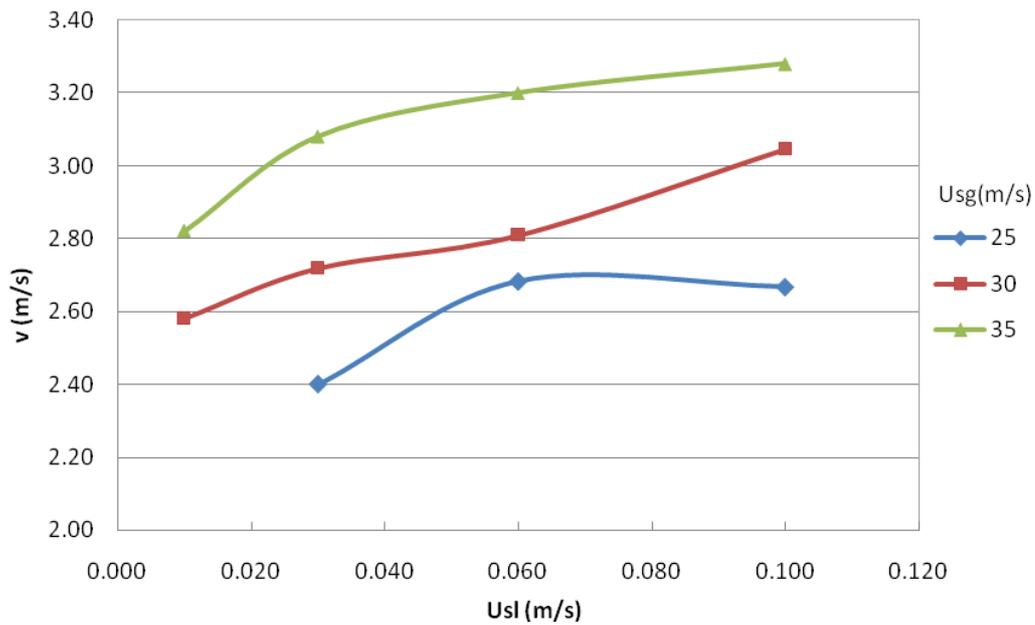


Figura 8.18 - Variação da velocidade de onda com a velocidade superficial de líquido para a seção de 50,8 mm.

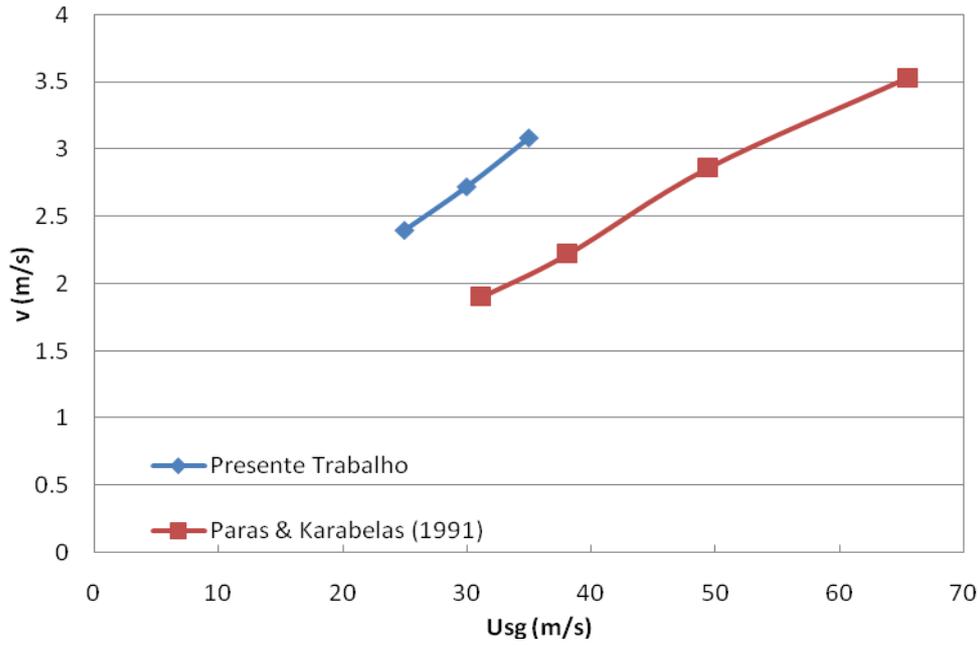


Figura 8.19 - Comparação entre os resultados da velocidade de onda do presente trabalho e Paras & Karabelas (1991) para a seção de 50,8 mm e $U_{sl}=0,03$ m/s.

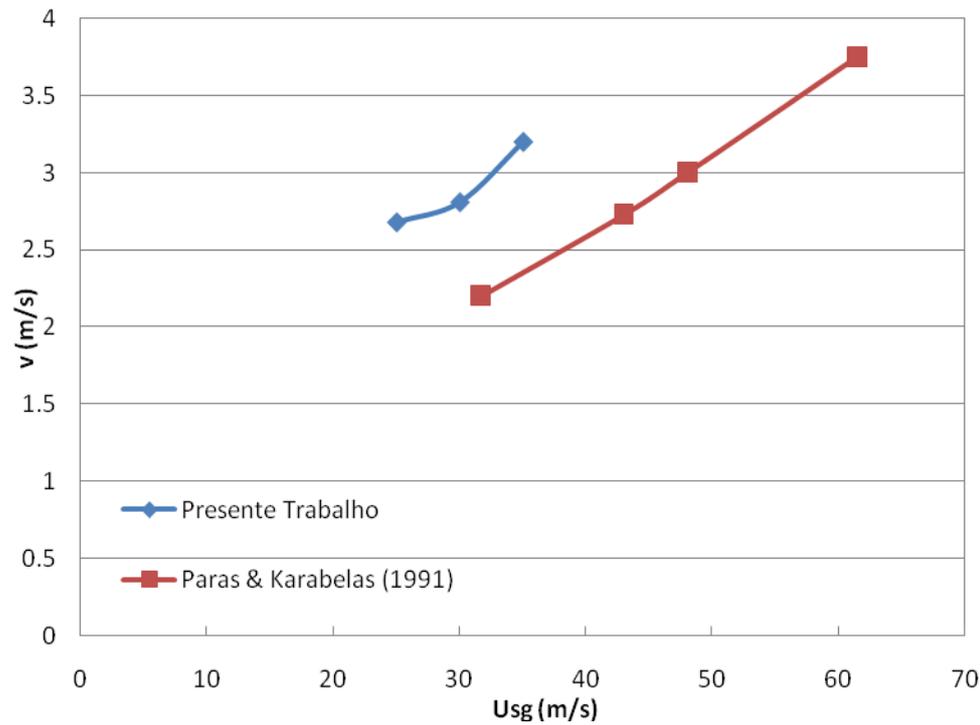


Figura 8.20 - Comparação dos resultados da velocidade de onda do presente trabalho e Paras & Karabelas (1991) para a seção de 50,8 mm e $U_{sl}=0,06$ m/s.

8.1.5. Espectro de Frequência da Espessura do Filme de Líquido

A distribuição de frequências nos sinais de espessura de filme capturados foi obtida através da determinação da densidade do espectro de frequência – *PSD* – como descrito na Seção 7.4. Da Figura 8.21 à Figura 8.35 são apresentados estes resultados para todas as condições de vazão de líquido e gás estudadas nas duas seções de testes. Esses resultados demonstram a capacidade da técnica óptica implementada de extrair informações espectrais dos dados de espessura de filme.

A Figura 8.21 e a Figura 8.22 apresentam o espectro de frequências medidos na seção de 15,8 mm, para as velocidades superficiais do gás de 20 e 24 m/s, respectivamente. Em cada figura são apresentadas distribuições de frequências para quatro valores da velocidade superficial do líquido. Pode-se observar que, para esta faixa de vazões de gás, os picos de frequência dominante são poucos sensíveis a variações da vazão de líquido. Esta observação foi também obtida no trabalho de Schubring & Shedd (2008), que relacionou esta insensibilidade da frequência dominante ao escoamento do filme de líquido que, para esta faixa de vazão de gás, predominantemente escoar no filme base, sem alterar a frequência de passagem das ondas à medida que a vazão de líquido é aumentada. Estes autores atribuíram este comportamento ao sub-padrão de escoamento anular-ondulado.

Para as velocidades superficiais de gás mais elevadas, Figura 8.23 e Figura 8.24, observa-se uma tendência de aumento das frequências dominantes com o aumento da velocidade superficial do líquido, observação também em acordo com o trabalho de Schubring & Shedd (2008). Para estas condições de escoamento os autores atribuíram este comportamento à incapacidade do excesso de líquido em escoar no filme base, que passa a escoar na forma de ondas, que tornam-se mais frequentes.

A mudança no comportamento das frequências dominantes com a velocidade superficial de líquido comentada anteriormente para os teste com o tubo de 15,8 mm de diâmetro, pode ser melhor observada com o auxílio da Figura 8.36. Nesta figura, os picos de frequência dominantes extraídos da Figura 8.21 à Figura 8.24 são apresentados em função da velocidade superficial do líquido. Nota-se claramente a inversão da tendência das frequências dominantes mencionada, a partir de uma determinada velocidade superficial de gás.

A influência da velocidade superficial de gás na distribuição de frequências da espessura de filme líquido pode ser melhor observada da Figura 8.25 à Figura 8.28, onde os espectros de frequência são apresentados em função da velocidade superficial de gás, para todas as velocidades superficiais de líquido investigadas.

Os resultados para a distribuição de frequências do filme obtidos para o tubo com diâmetro de 50,8 mm são apresentados da Figura 8.29 à Figura 8.35. Observa-se nestas figuras uma dependência decrescente das frequências dominantes do espectro com o aumento da velocidade superficial de líquido, comportamento distinto daquele observado nos resultados para a seção de 15,8 mm de diâmetro. Isto pode ser melhor observado com o auxílio da Figura 8.37 e da Figura 8.38, onde os picos de frequência são apresentados em função da velocidade superficial do gás e líquido, respectivamente. Estes resultados se assemelham com aqueles apresentados por Jayanti et al. (1990) e Paras & Karabelas (1991) realizados em seções de teste com tubos de diâmetros de 30,2 e 50,8 mm de diâmetro, respectivamente.

Os resultados de espectro de frequência apresentados nesta seção para os dois diâmetros de tubulação mostram um aumento na frequência dominante da espessura de filme com o aumento da velocidade superficial de gás, para todas as velocidades superficiais de líquido investigadas. Este comportamento também foi observado por Jayanti et al. (1990), Paras & Karabelas (1991) e Schubring & Shedd (2008). Ainda, para as duas seções, observa-se um espalhamento horizontal das curvas de espectro de frequência com o aumento da velocidade superficial de gás. Este comportamento é uma consequência da redistribuição de energia das ondas por uma faixa de frequências mais ampla. Os espectros apresentam agora menores valores máximos de potência associados às frequências dominantes.

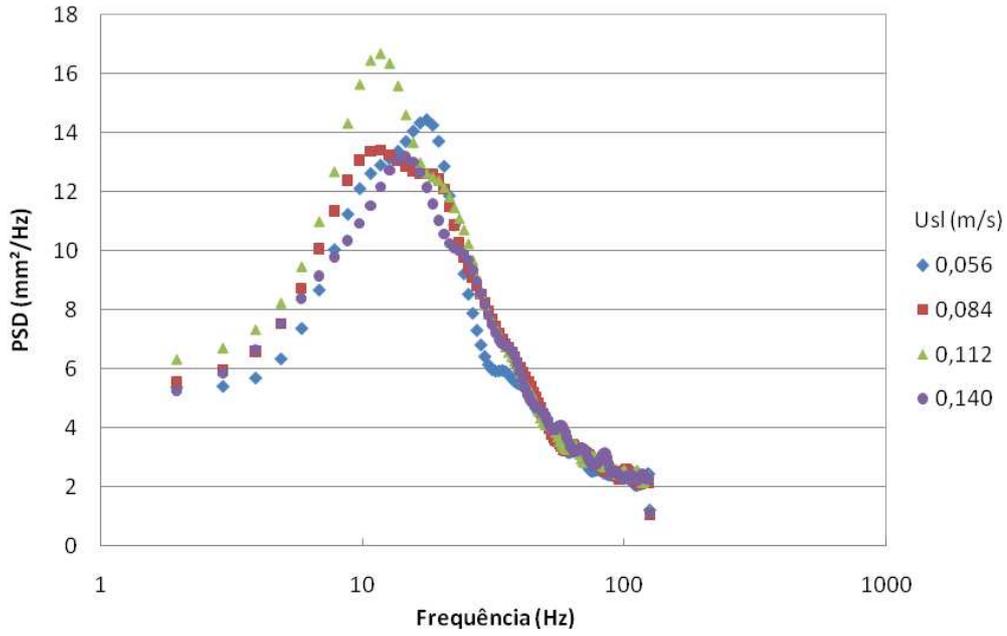


Figura 8.21 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para $U_{sg}=20\text{ m/s}$ e $D=15,8\text{mm}$.

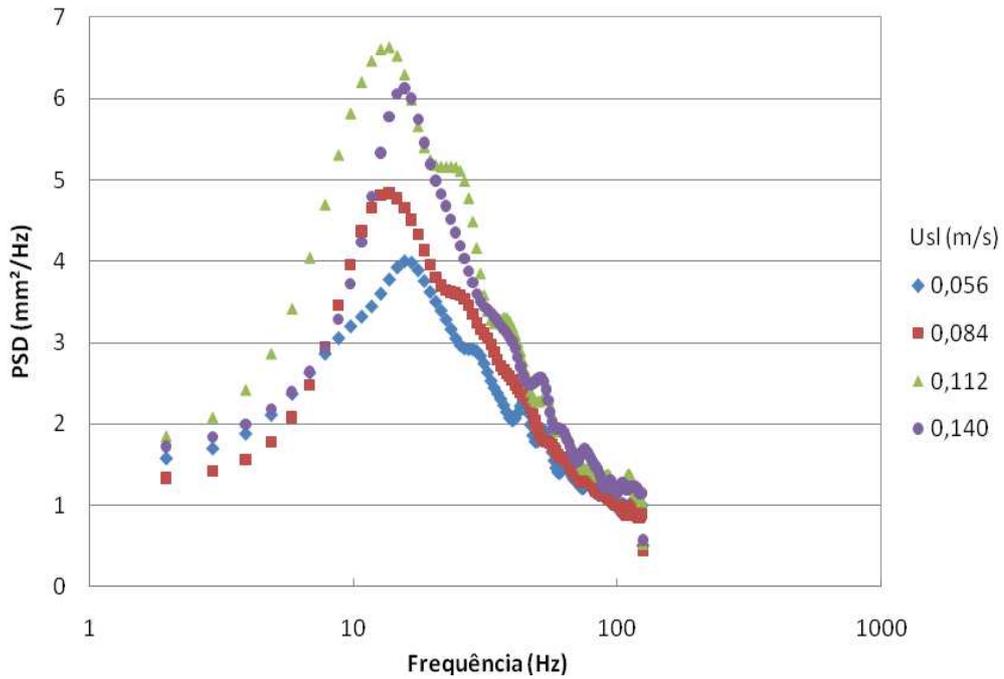


Figura 8.22 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para $U_{sg}=24\text{ m/s}$ e $D=15,8\text{mm}$.

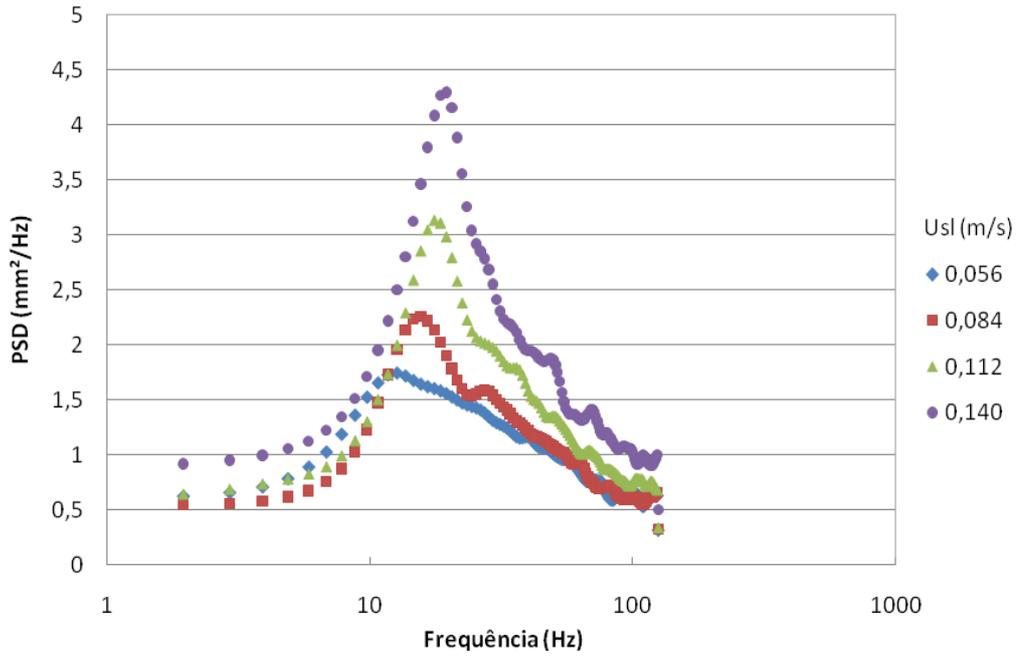


Figura 8.23 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para $U_{sg}=28\text{ m/s}$ e $D=15,8\text{mm}$.

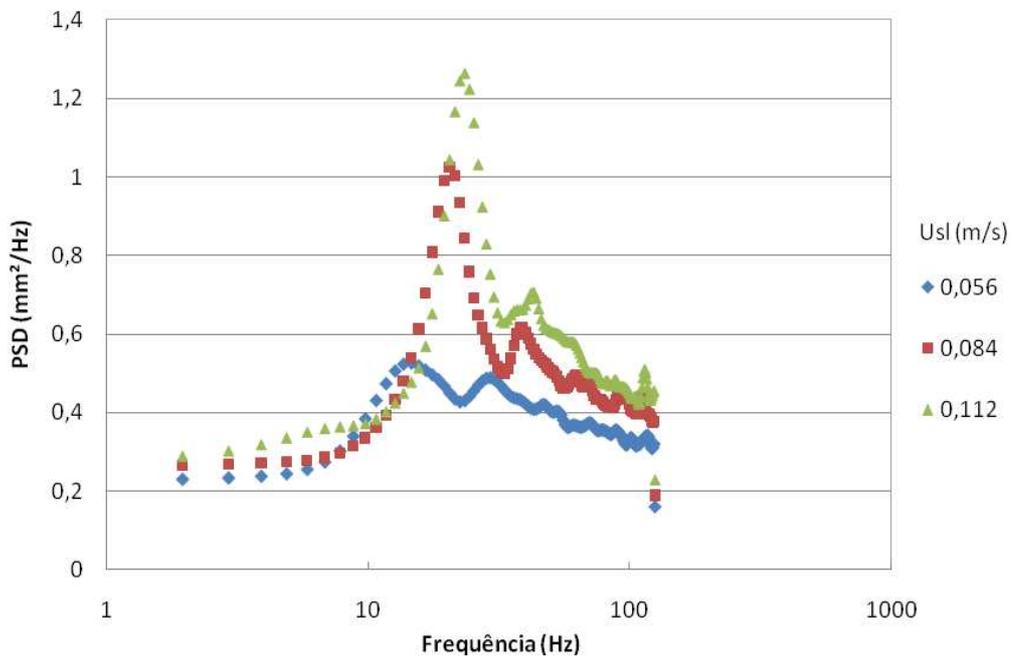


Figura 8.24 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para $U_{sg}=34\text{ m/s}$ e $D=15,8\text{mm}$.

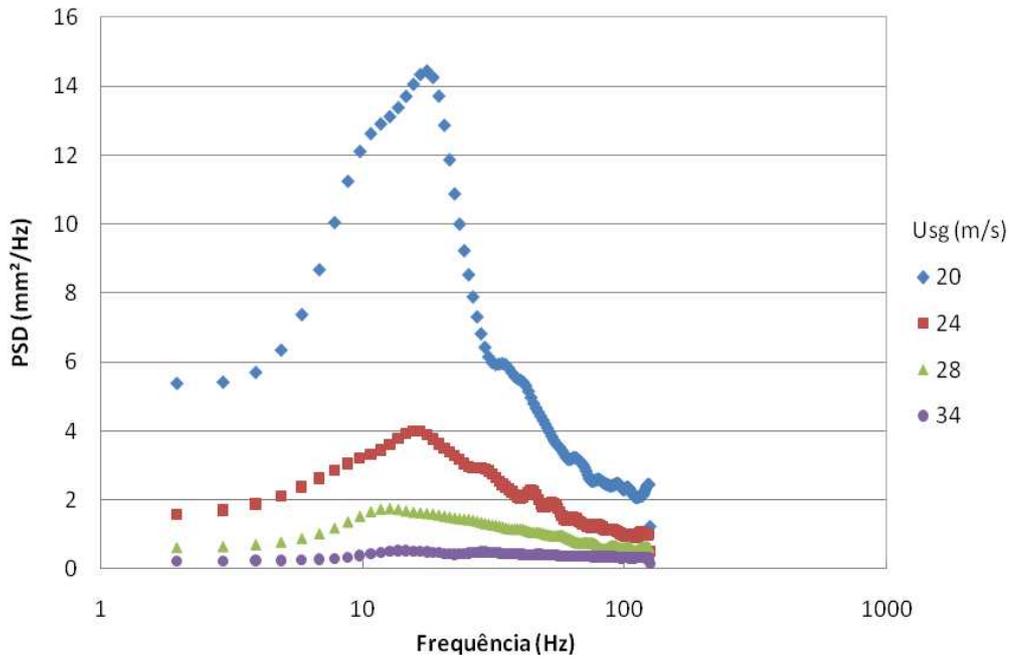


Figura 8.25 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sf}=0,056 \text{ m/s}$ e $D=15,8\text{mm}$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821298/CA

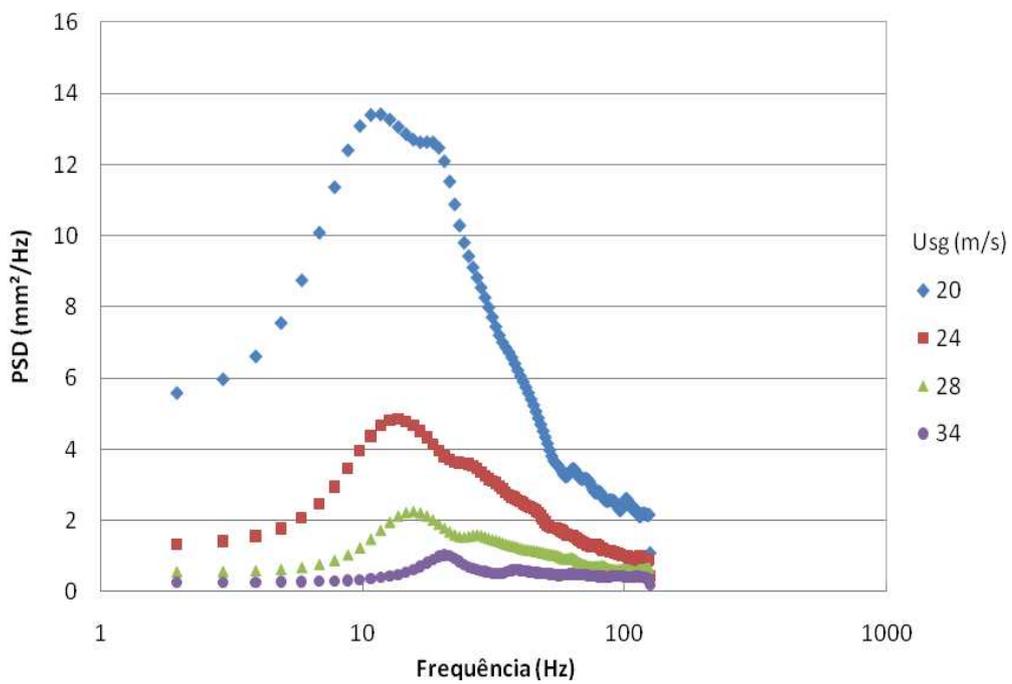


Figura 8.26 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sf}=0,084 \text{ m/s}$ e $D=15,8\text{mm}$.

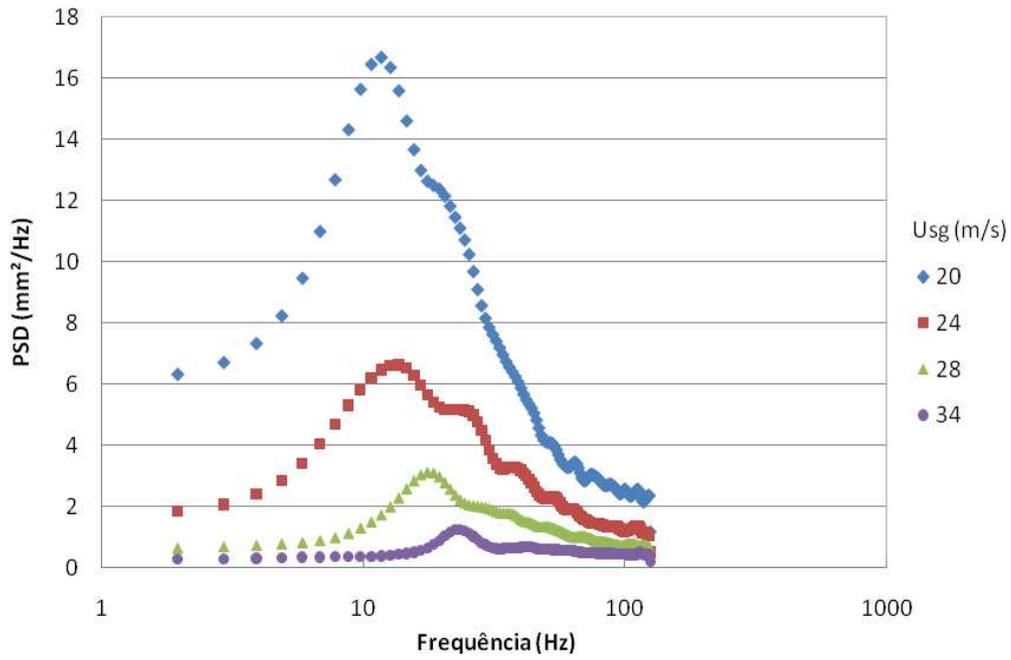


Figura 8.27 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sf}=0,112$ m/s e $D=15,8$ mm.

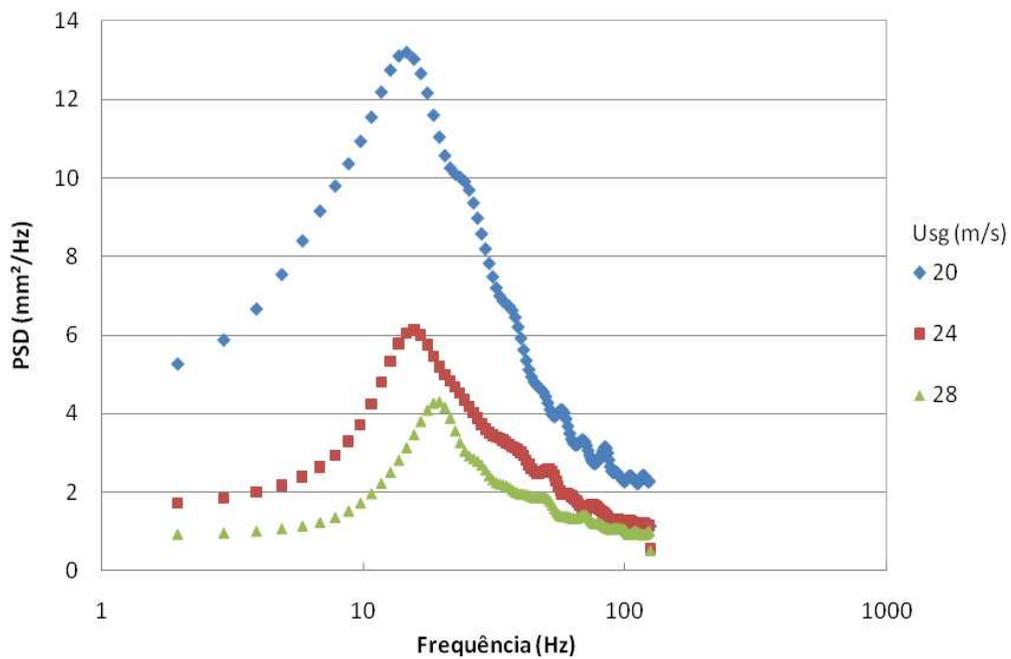


Figura 8.28 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sf}=0,140$ m/s e $D=15,8$ mm.

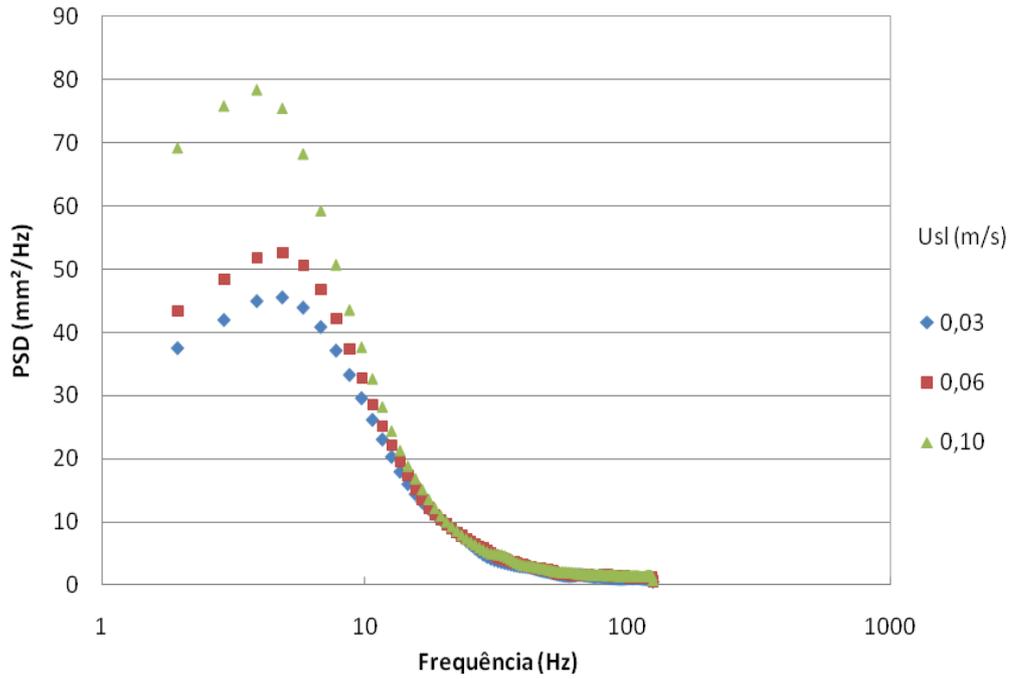


Figura 8.29 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para $U_{sg}=25$ m/s e $D=50,8$ mm.

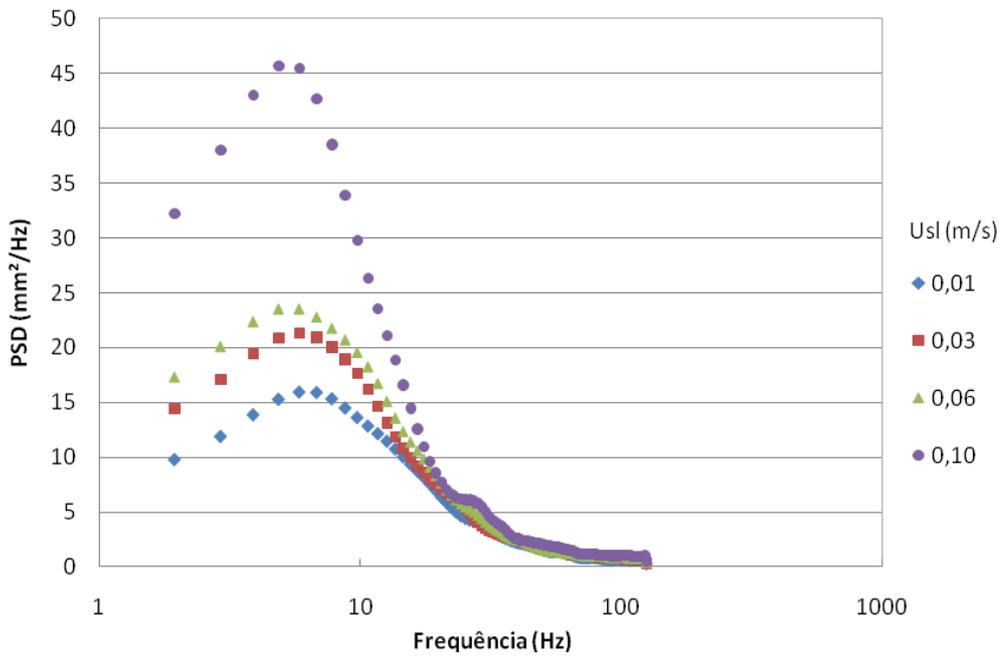


Figura 8.30 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para $U_{sg}=30$ m/s e $D=50,8$ mm.

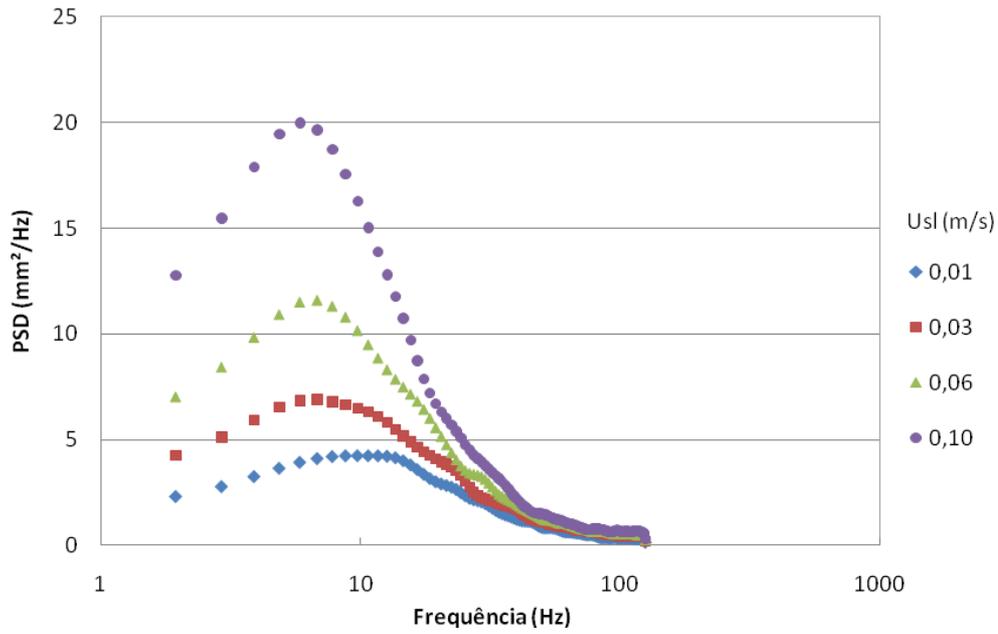


Figura 8.31 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para $U_{sg}=35 \text{ m/s}$ e $D=50,8\text{mm}$.

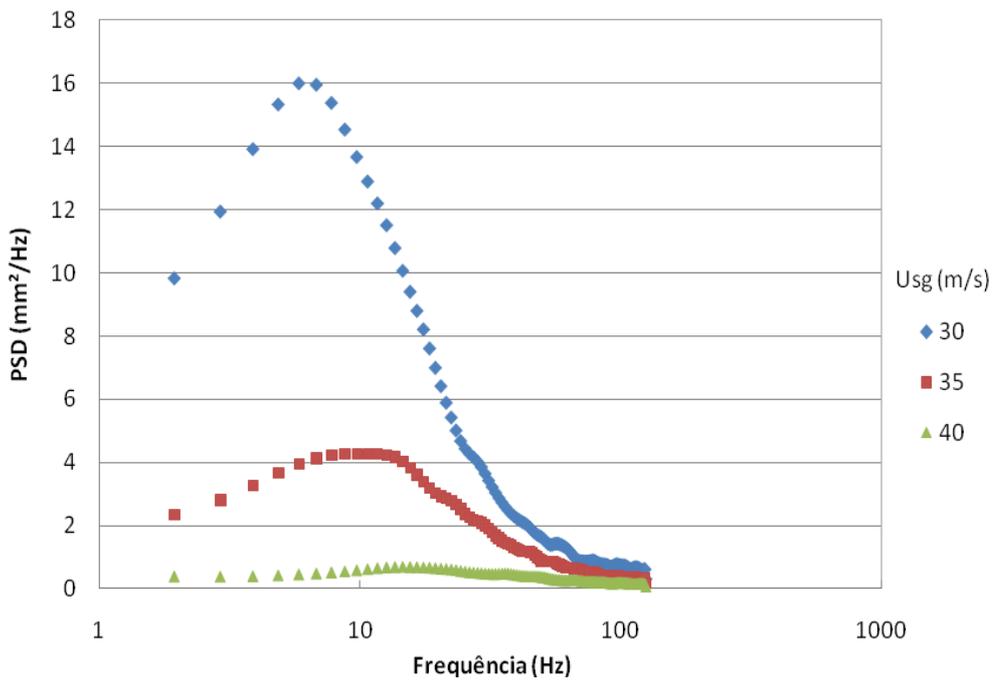


Figura 8.32 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sl}=0,01 \text{ m/s}$ e $D=50,8\text{mm}$.

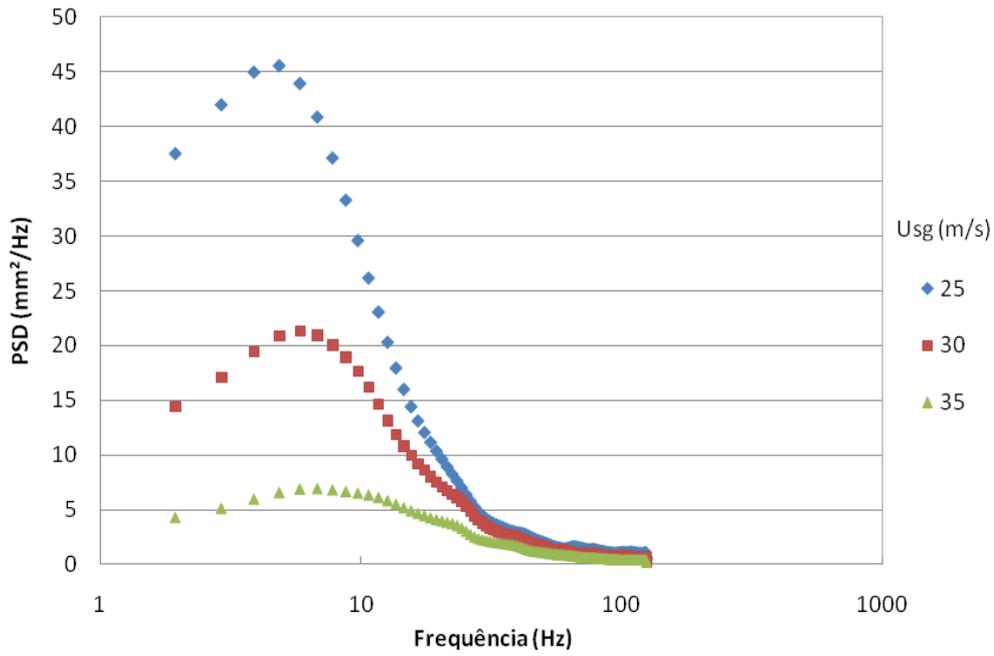


Figura 8.33 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sf}=0,03$ m/s e $D=50,8$ mm.

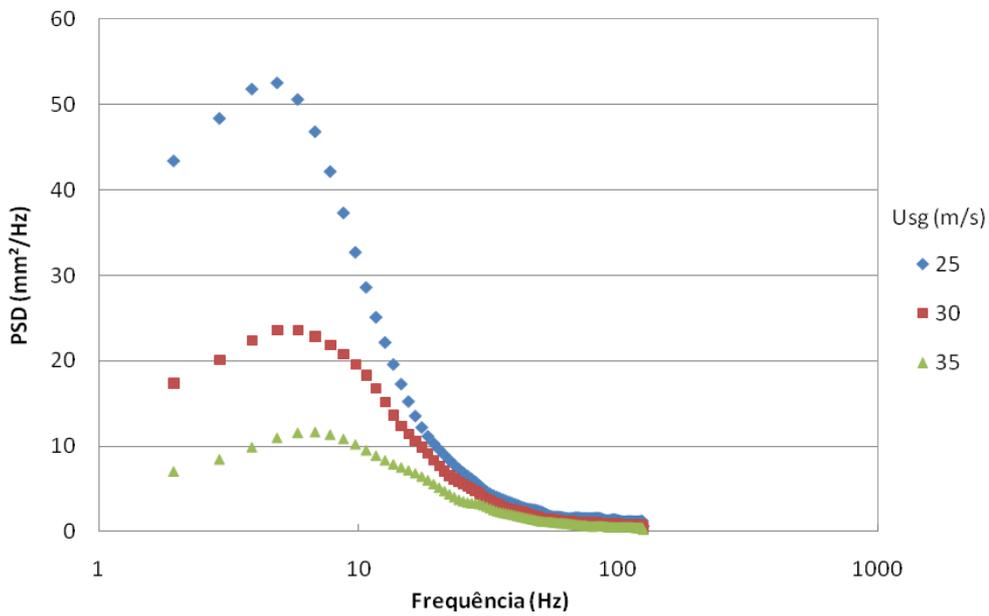


Figura 8.34 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sf}=0,06$ m/s e $D=50,8$ mm.

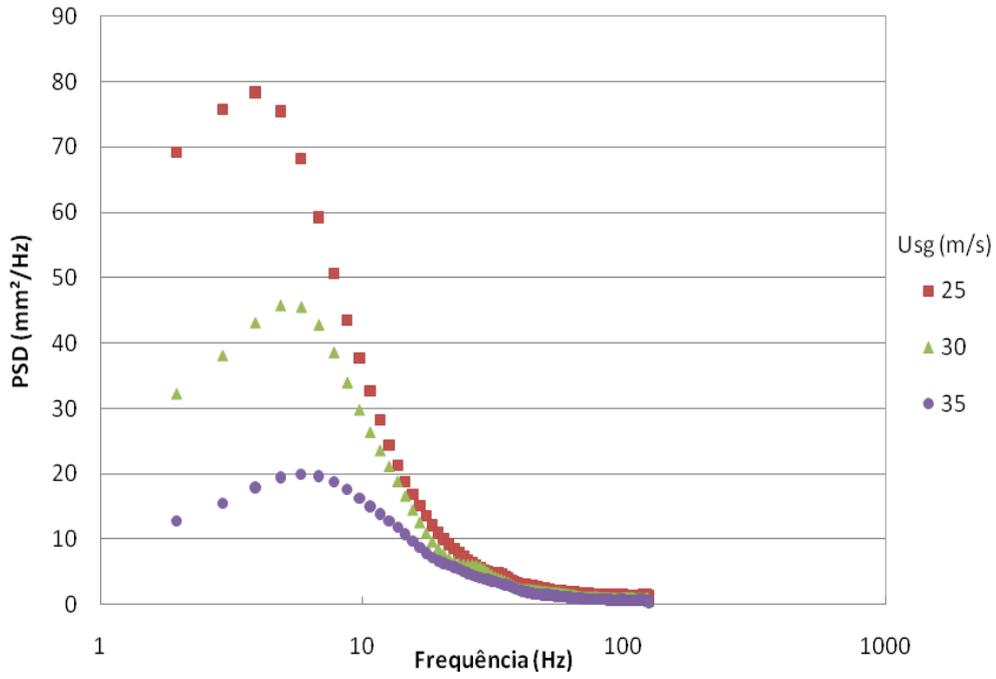


Figura 8.35 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sl}=0,1$ m/s e $D=50,8$ mm.

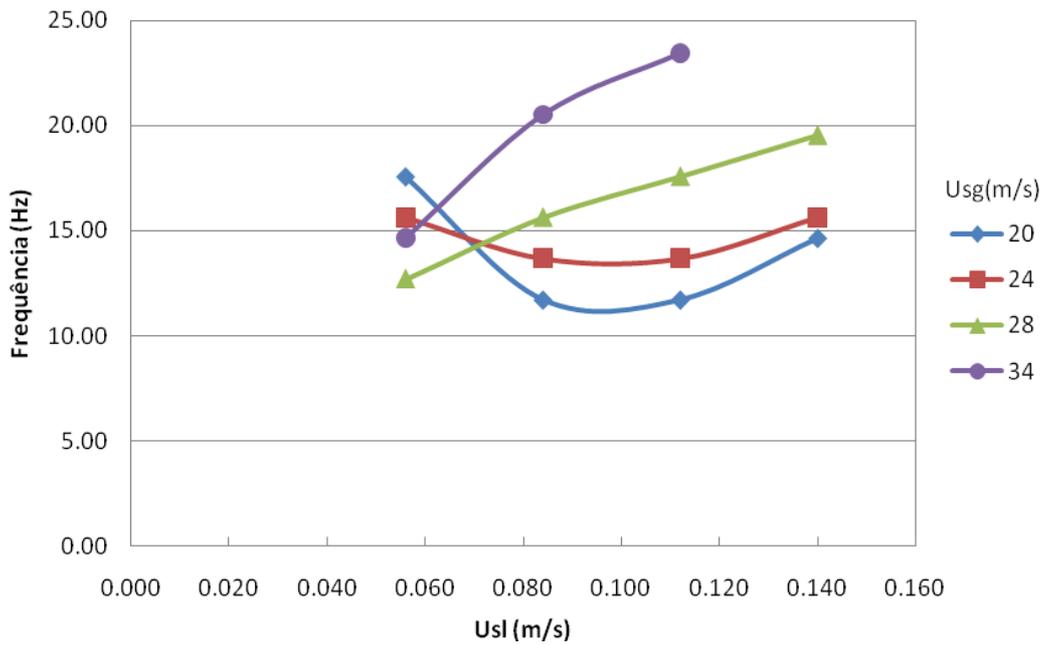


Figura 8.36 - Frequências dominantes para diferentes velocidades superficiais de gás para a seção de 15,8 mm.

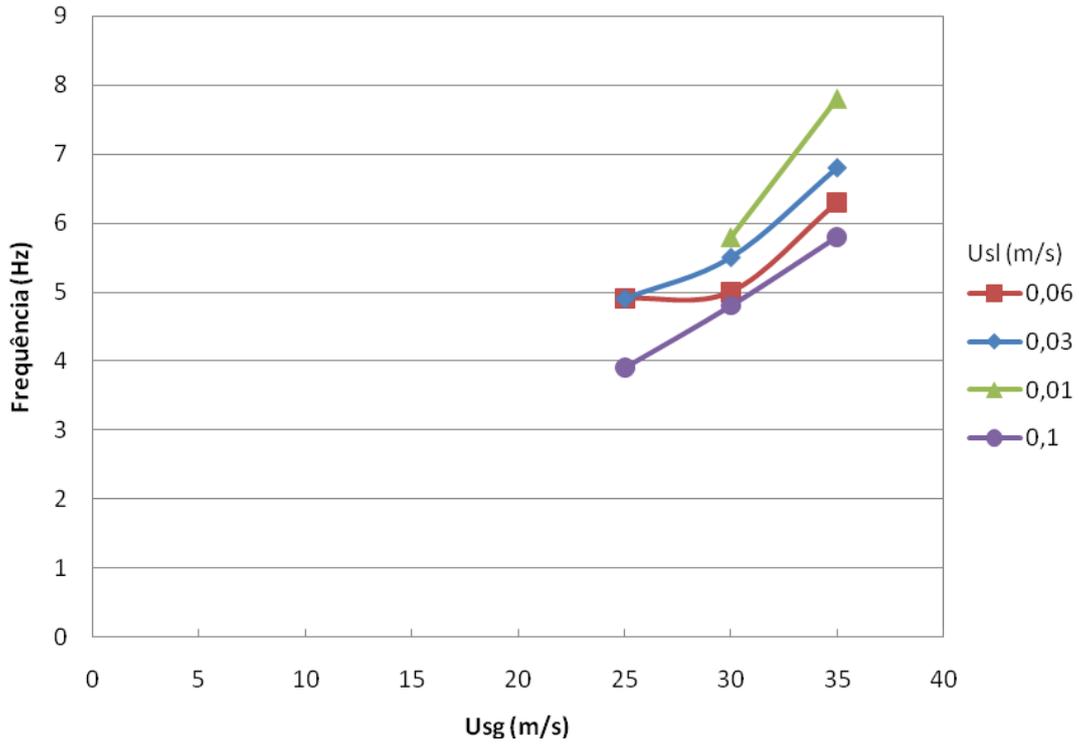


Figura 8.37 - Frequências dominantes para diferentes velocidades superficiais de gás para a seção de 50,8 mm.

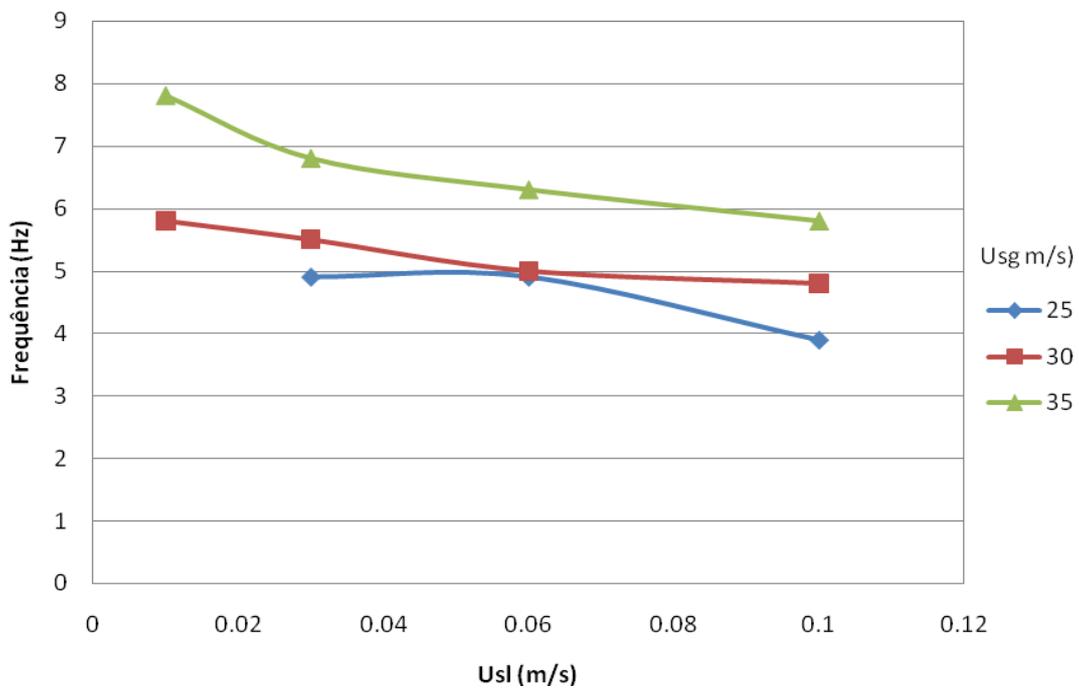


Figura 8.38 - Frequências dominantes para diferentes velocidades superficiais de líquido para a seção de 50,8 mm.

8.1.6. Histograma de Espessura de Filme de 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. Um destes histogramas é mostrado no tradicional formato de barras na Figura 8.39, para o caso caracterizado por $U_{sg}=20$ m/s e $U_{sl}=0.112$ m/s. 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 8.39.

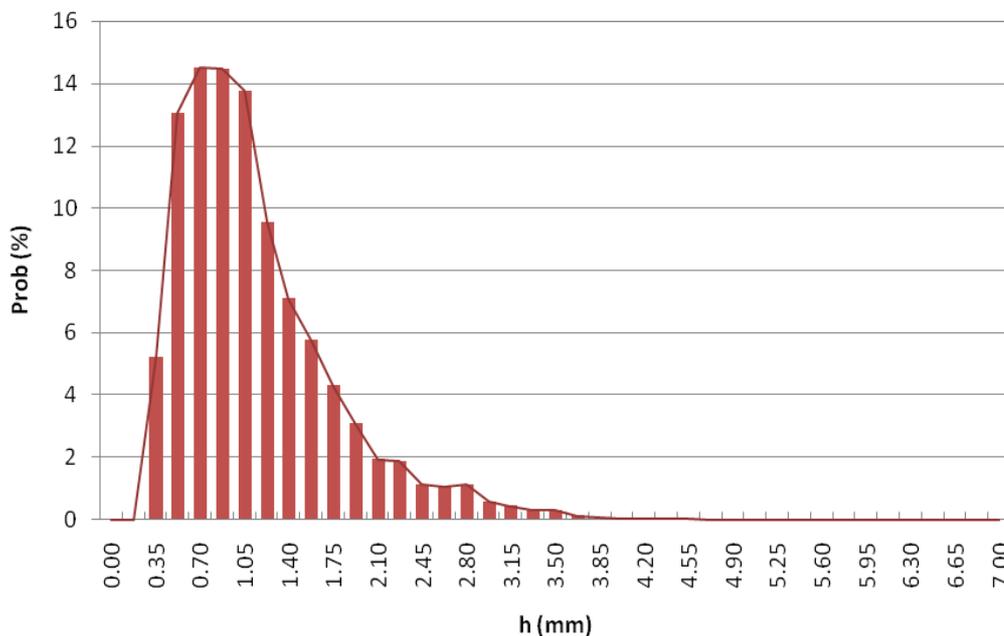


Figura 8.39 - Histograma da espessura de filme líquido para $U_{sg}=20$ m/s e $U_{sl}=0,112$ para a seção de 15,8 mm.

Da Figura 8.40 à Figura 8.47 são apresentadas comparações entre os histogramas obtidos para a seção de testes de 15,8 mm. Nestas figuras pode-se observar a influência da velocidade superficial de líquido para quatro valores de velocidade superficial do gás. Uma análise conjunta das figuras 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. 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. Nota-se também uma pequena influência da

velocidade superficial do líquido na forma da distribuição das espessuras representadas pelos histogramas.

Da Figura 8.48 à Figura 8.54 são apresentadas as comparações dos histogramas de espessuras para a seção de testes de 50,8 mm de diâmetro. Os resultados obtidos apresentam tendências semelhantes àquelas observadas para o tubo de menor diâmetro.

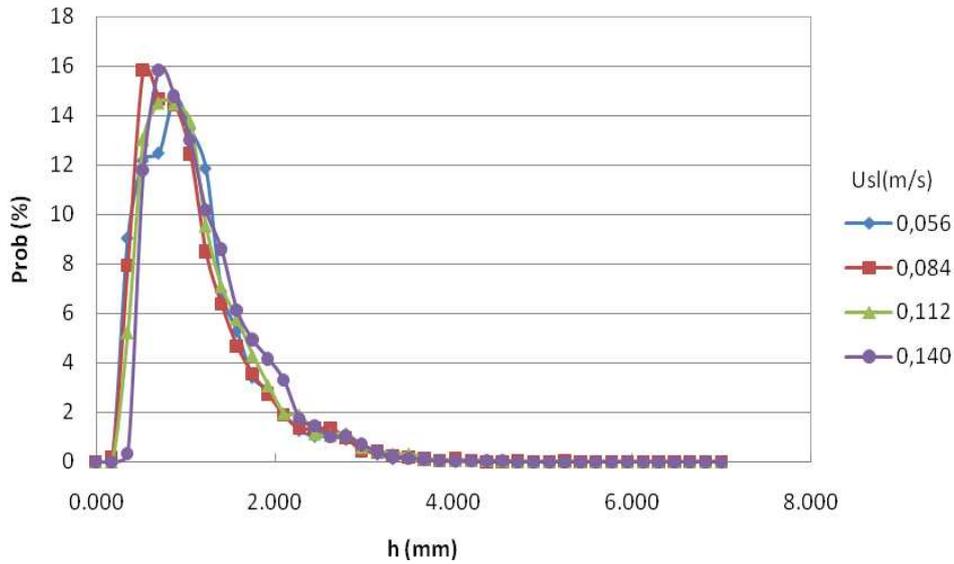


Figura 8.40 - Histograma da espessura do filme para $U_{sg}=20\text{ m/s}$ e $D=15,8\text{ mm}$.

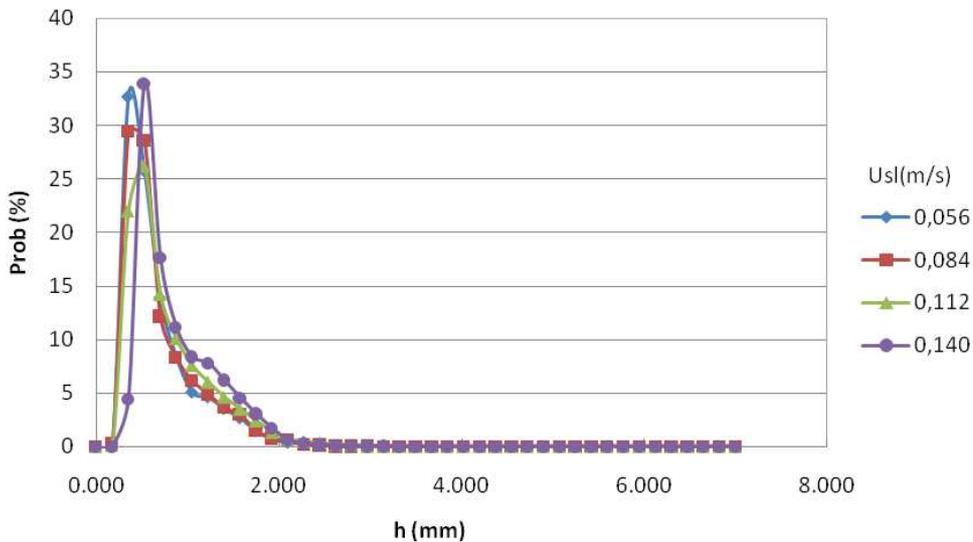


Figura 8.41 - Histograma da espessura do filme para $U_{sg}=24\text{ m/s}$ e $D=15,8\text{ mm}$.

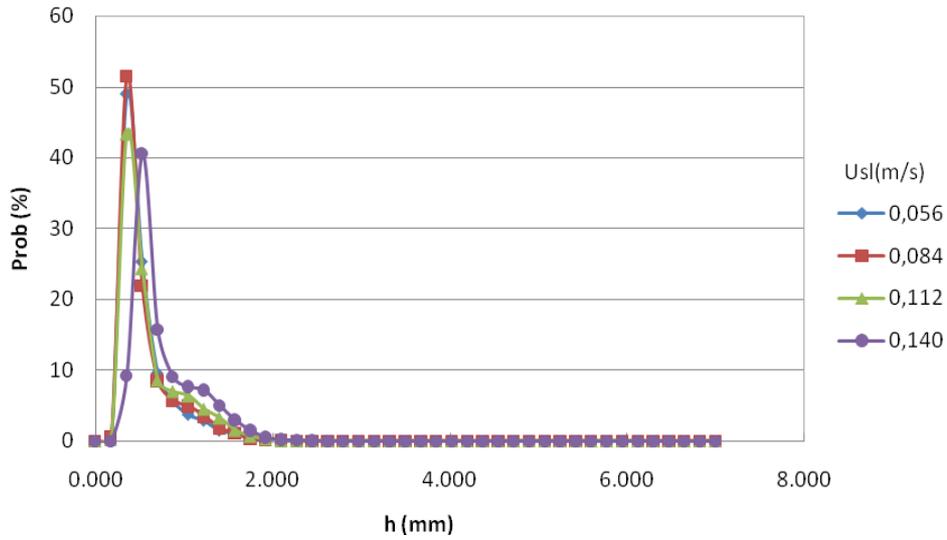


Figura 8.42 - Histograma da espessura do filme para $U_{sg}=28$ m/s e $D=15,8$ mm.

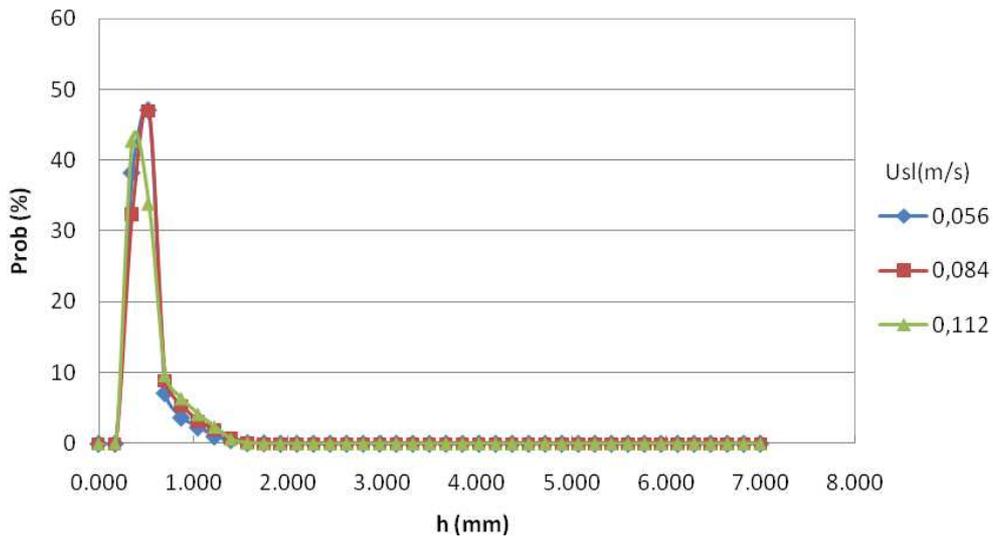


Figura 8.43 - Histograma da espessura do filme para $U_{sg}=34$ m/s e $D=15,8$ mm.

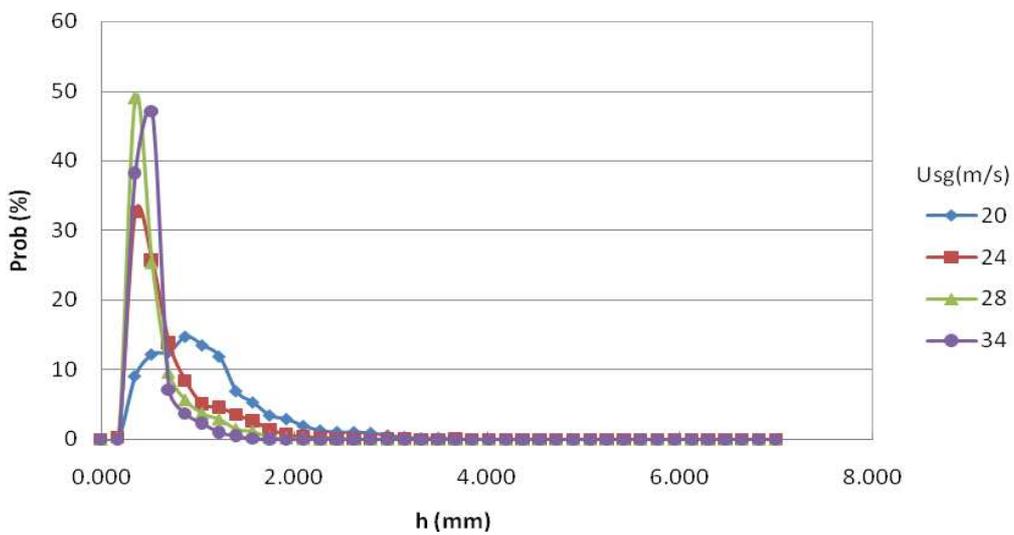


Figura 8.44 - Histograma da espessura do filme para $U_s=0,056$ m/s e $D=15,8$ mm.

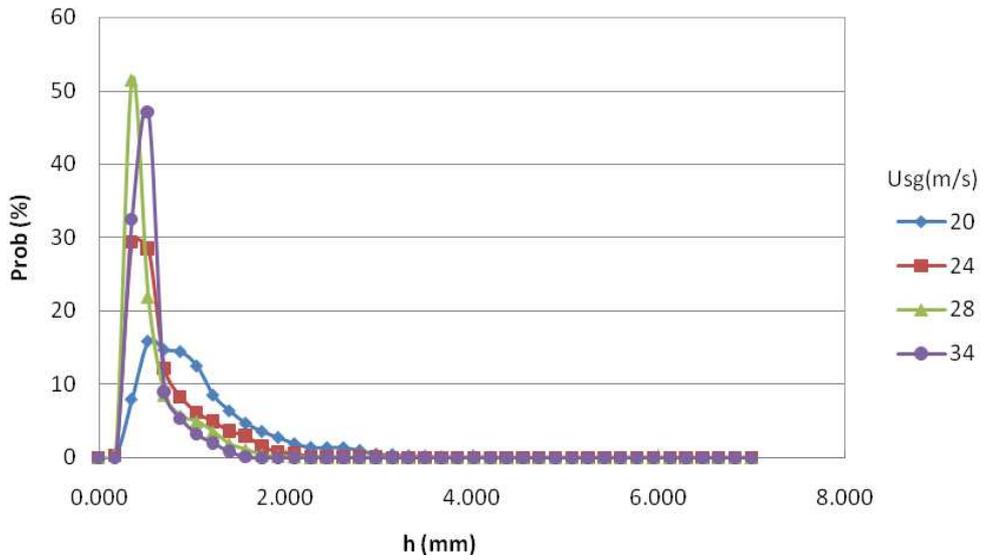


Figura 8.45 - Histograma da espessura do filme para $U_{sf}=0,084$ m/s e $D=15,8$ mm.

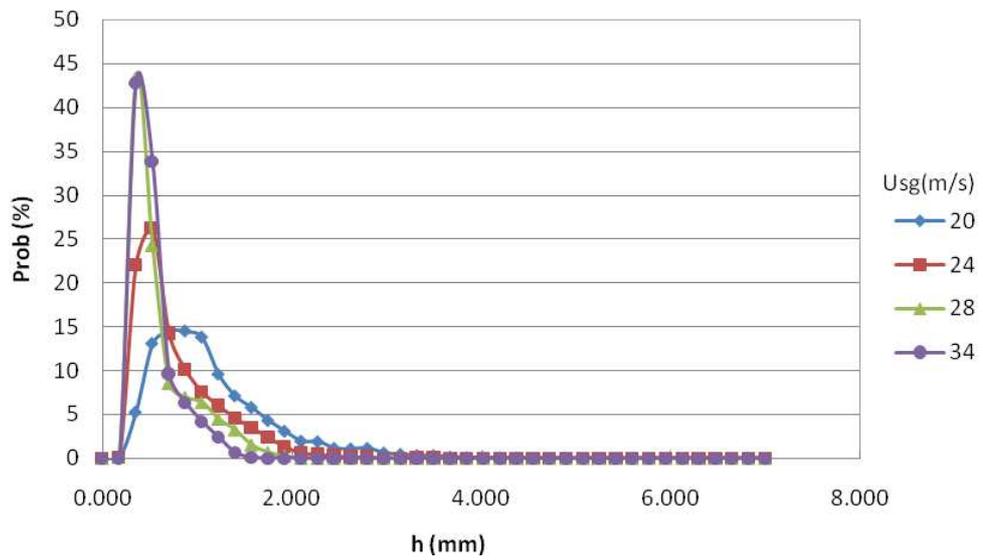


Figura 8.46 - Histograma da espessura do filme para $U_{sf}=0,112$ m/s e $D=15,8$ mm.

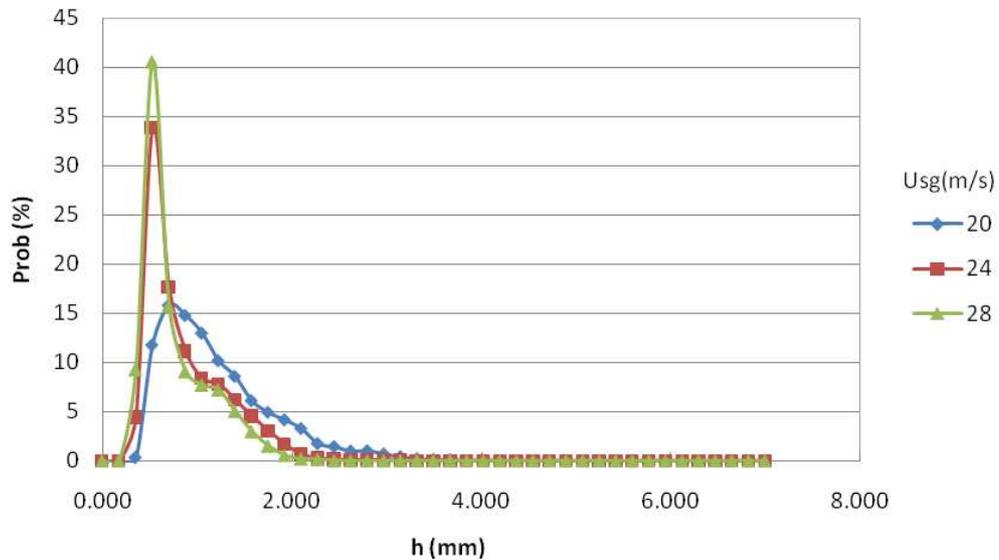


Figura 8.47 - Histograma da espessura do filme de para $U_{sf}=0,140$ m/s e $D=15,8$ mm.

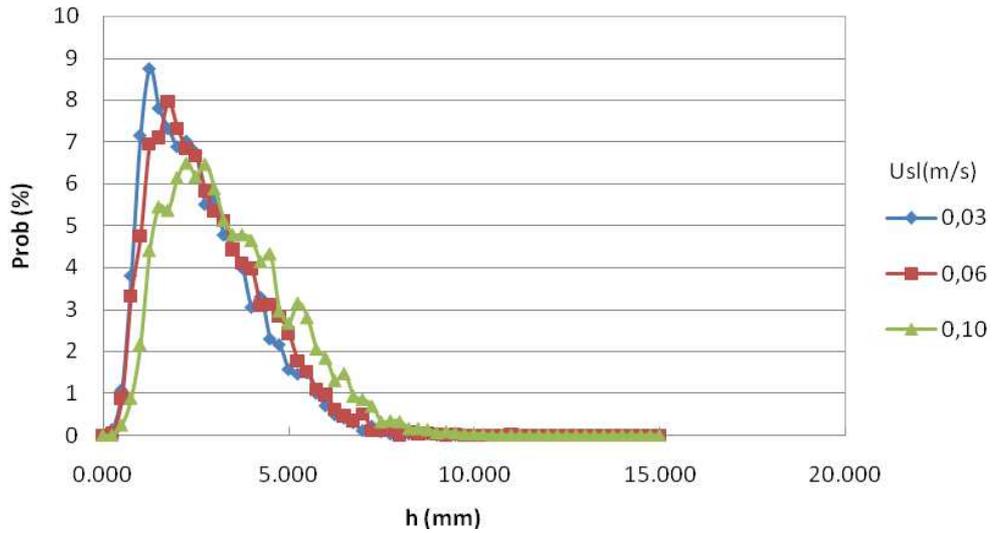


Figura 8.48 - Histograma da espessura do filme para $U_{sg}=25\text{ m/s}$ e $D=50,8\text{ mm}$.

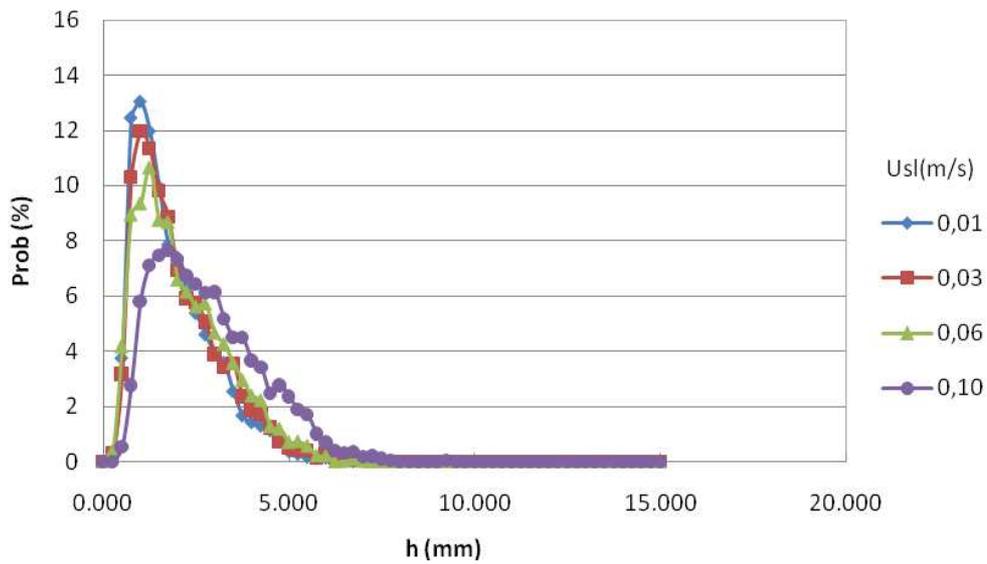


Figura 8.49 - Histograma da espessura do filme para $U_{sg}=30\text{ m/s}$ e $D=50,8\text{ mm}$.

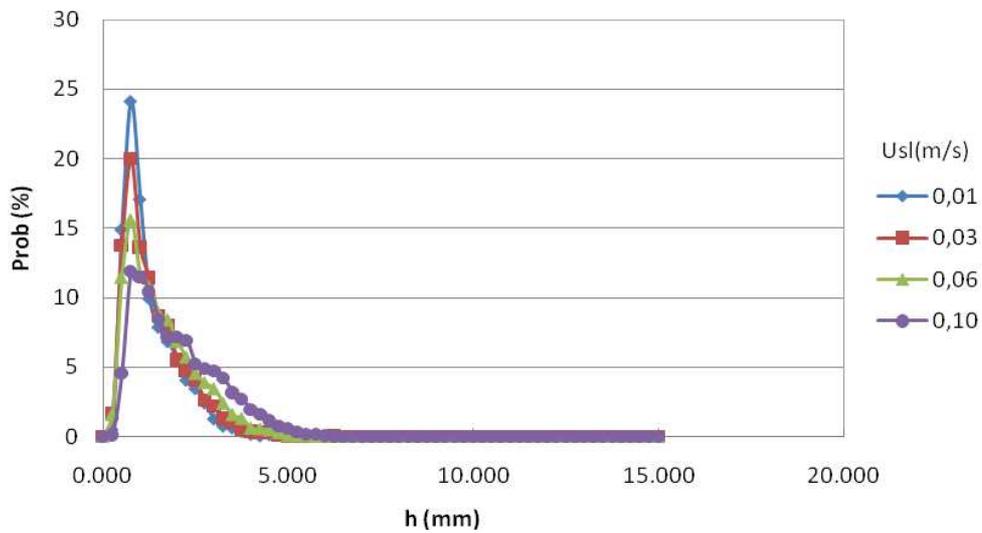


Figura 8.50 - Histograma da espessura do filme para $U_{sg}=35\text{ m/s}$ e $D=50,8\text{ mm}$.

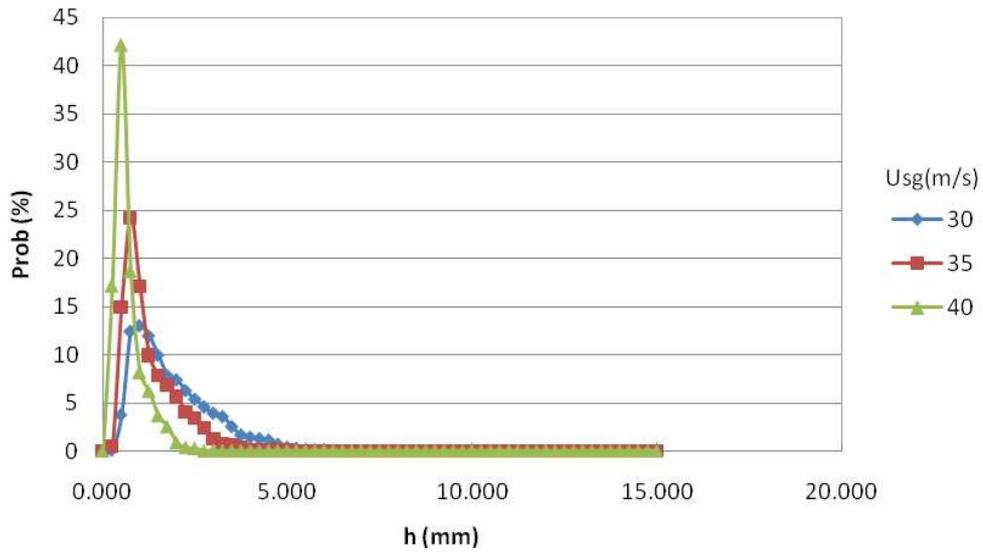


Figura 8.51 - Histograma da espessura do filme para $U_s=0,01$ m/s e $D=50,8$ mm.

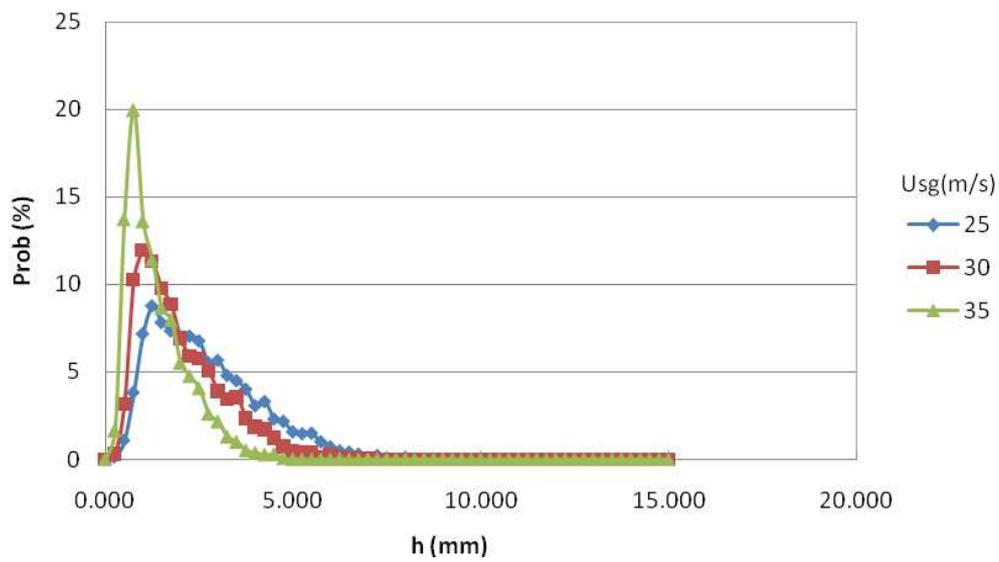


Figura 8.52 - Histograma da espessura do filme para $U_s=0,03$ m/s e $D=50,8$ mm.

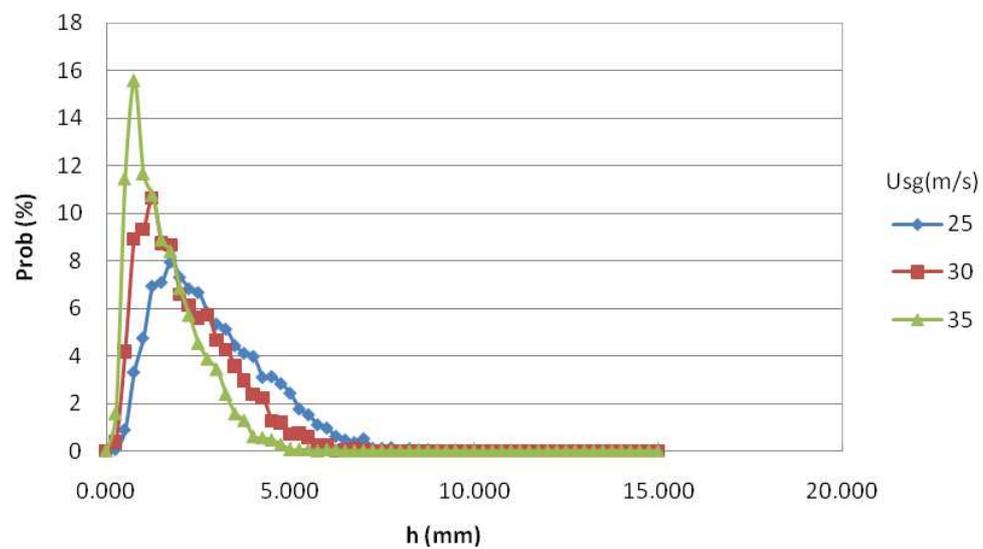


Figura 8.53 - Histograma da espessura do filme para $U_s=0,06$ m/s e $D=50,8$ mm.

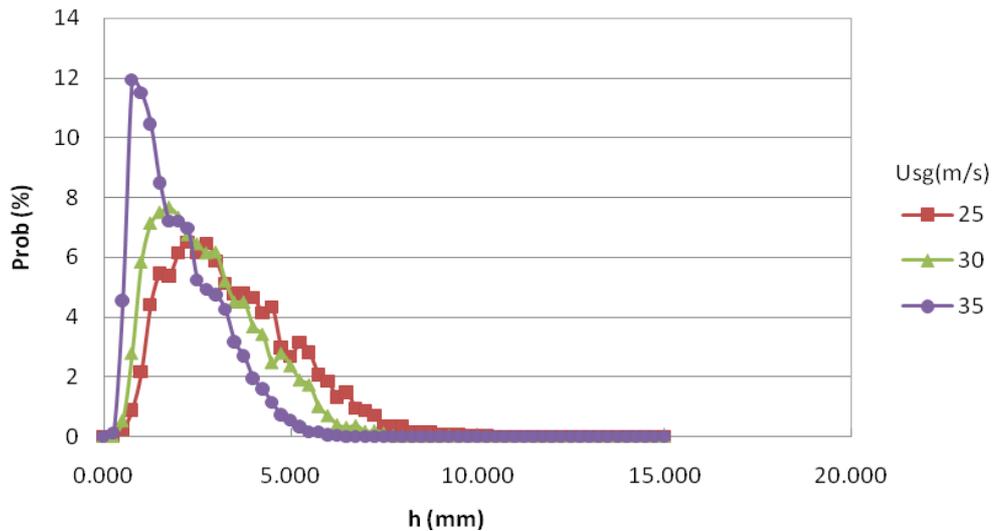


Figura 8.54 - Histograma da espessura do filme para $U_{sr}=0,1$ m/s e $D=50,8$ mm.

8.1.7. Evolução Espacial e Temporal das Ondas de Líquido

Os procedimentos desenvolvidos para a análise das imagens instantâneas capturadas do filme de líquido descritos no Capítulo 5, utilizaram informações limitadas destas imagens. De fato, apenas as regiões das imagens nas posições das duas sondas de medição foram utilizadas na determinação da variação temporal da espessura do filme de líquido.

A medição da espessura instantânea do filme de líquido ao longo de toda a extensão axial de cada imagem pode ser utilizada para produzir informações relevantes sobre a evolução temporal e espacial do filme. Para isso, a espessura do filme foi identificada em toda a largura da imagem, para todas as imagens registradas de um dado experimento. A captura das imagens nesse caso é feita sempre a elevadas taxas de aquisição, tipicamente 3000 Hz, para garantir uma boa resolução temporal do filme de líquido. 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 título de comparação, pode-se mencionar o recente trabalho de Belt (2010) que utilizou a técnica de múltiplos sensores condutivos montados rente à parede interna do tubo e distribuídos axial e circunferencialmente. Os 320 sensores utilizados são interrogados utilizando a tecnologia empregada nas sondas do tipo *wire-mesh* (Prasser et al., 1998) e produzem informações instantâneas sobre a distribuição de espessura do filme de líquido. A resolução espacial obtida por estes autores

foi de cerca de 17 mm na direção axial, comparada aos 0,050 mm de resolução obtidos com a técnica desenvolvida no presente trabalho.

Recentemente, Alekseenko (2008) apresentou uma nova técnica para a medição transiente do filme de líquido também baseada na fluorescência induzida por laser, que produz resoluções temporais e espaciais equivalentes às do presente trabalho. No entanto, esta técnica não fornece as imagens instantâneas do escoamento, sendo baseada na relação entre intensidade de fluorescência e espessura do filme obtida por procedimento prévio de calibração.

Da Figura 8.55 à Figura 8.58 são apresentados quatro mapas de evolução espaço-temporal da espessura de filme de líquido obtidos pela técnica desenvolvida para as seções de 15,8 e 50,8 mm. Para cada diâmetro, são apresentados dois mapas que ilustram a passagem das ondas de grande e pequena amplitudes. Cada mapa corresponde a um intervalo de 0,05 segundos de escoamento.

Os mapas apresentados nas figuras permitem observar com riqueza de detalhes a evolução das ondas no espaço e no tempo. Pode-se, por exemplo, identificar a presença de ondas de pequena amplitude superpondo-se às grandes ondas, assim como a coalescência de ondas de pequena amplitude formando ondas de maior amplitude, como indicado pelas setas na Figura 8.56.

Os mapas de espaço e tempo permitem também que a velocidade de propagação de ondas individuais seja obtida, ao contrário da velocidade do grupo fornecida pela técnica da correlação cruzada apresentada na Seção 7.3. A velocidade de ondas individuais pode ser determinada pela inclinação no plano $x - t$ das linhas de máximo local de espessura.

Deve-se mencionar que os mapas espaço-temporais apresentados foram desenvolvidos ao final do presente trabalho. Assim, não foi possível, dentro do tempo disponível para a conclusão desta dissertação, realizar uma análise detalhada destes mapas que, certamente, produziriam informações relevantes sobre a estrutura dinâmica do filme de líquido. Estes exemplos de mapas foram introduzidos no texto para demonstrar a capacidade de medição da técnica desenvolvida. Fica aqui uma sugestão para a continuação do presente trabalho analisando detalhadamente os mapas espaço-temporais para as diversas configurações do escoamento investigadas.

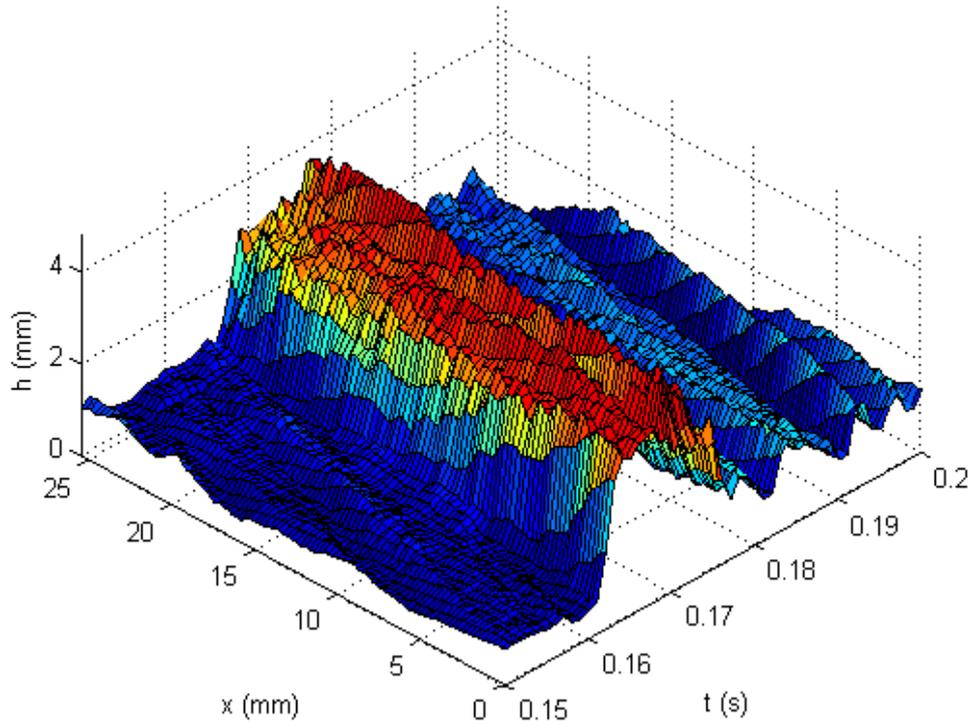


Figura 8.55 - Diagrama espaço-tempo para $U_{sf}=0,140$ m/s e $U_{sg}=20$ m/s para a seção com 15,8 mm de diâmetro interno.

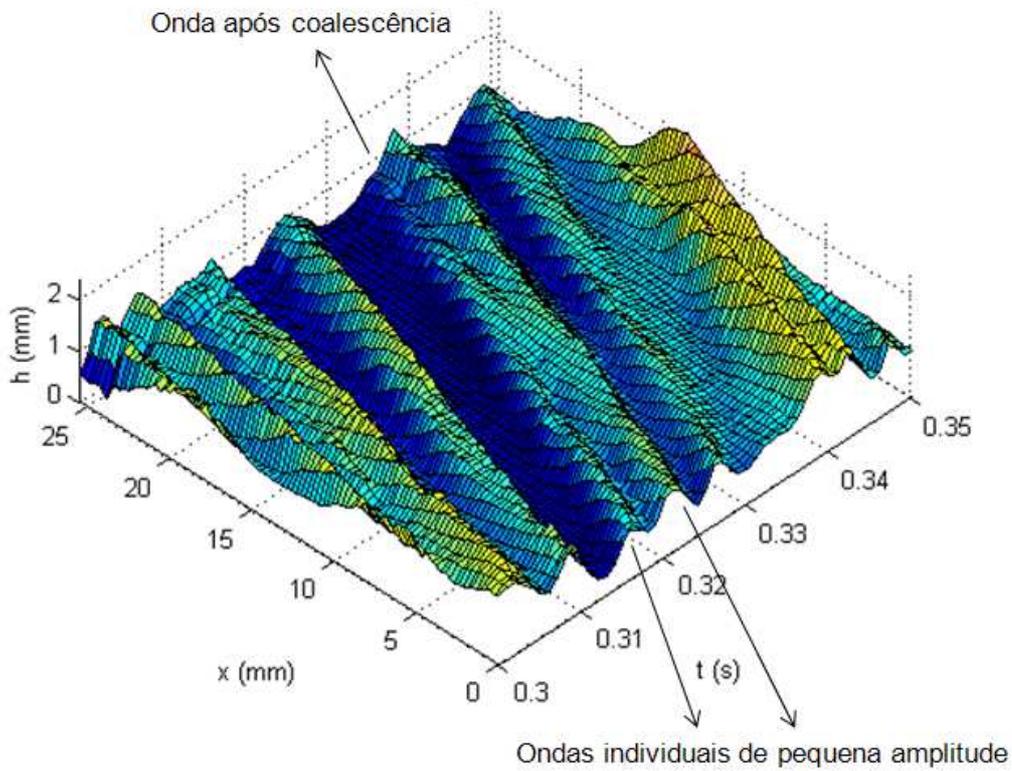


Figura 8.56 - Diagrama espaço-tempo para $U_{sf}=0,140$ m/s e $U_{sg}=20$ m/s para a seção com 15,8 mm de diâmetro interno

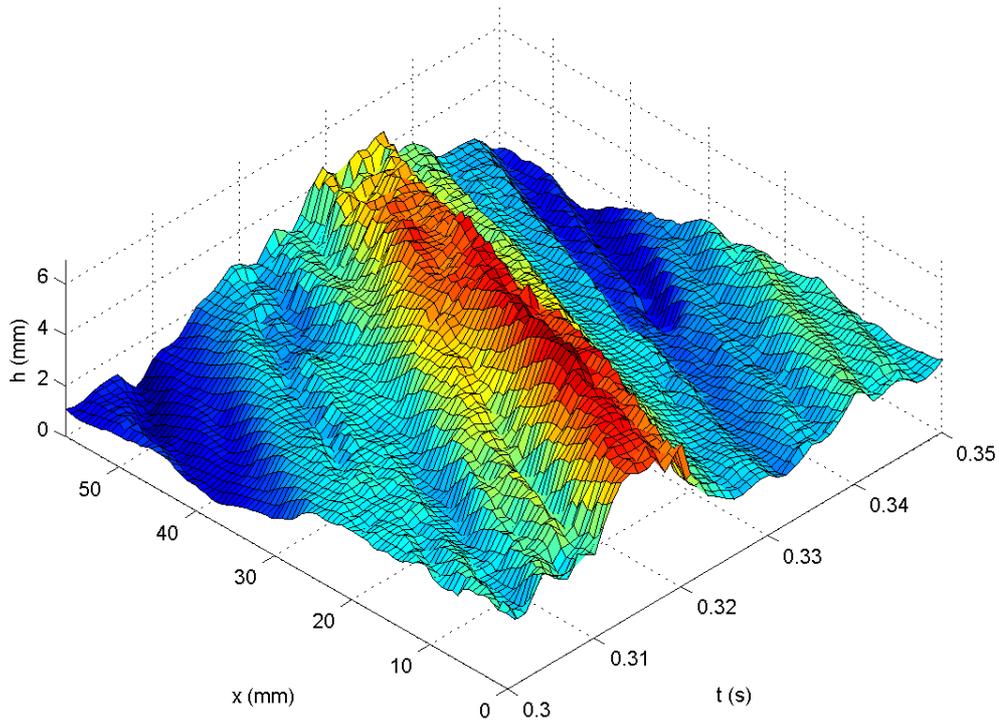


Figura 8.57 - Diagrama espaço-tempo para $U_{sf}=0,1$ m/s e $U_{sg}=30$ m/s para a seção com 50,8 mm de diâmetro interno.

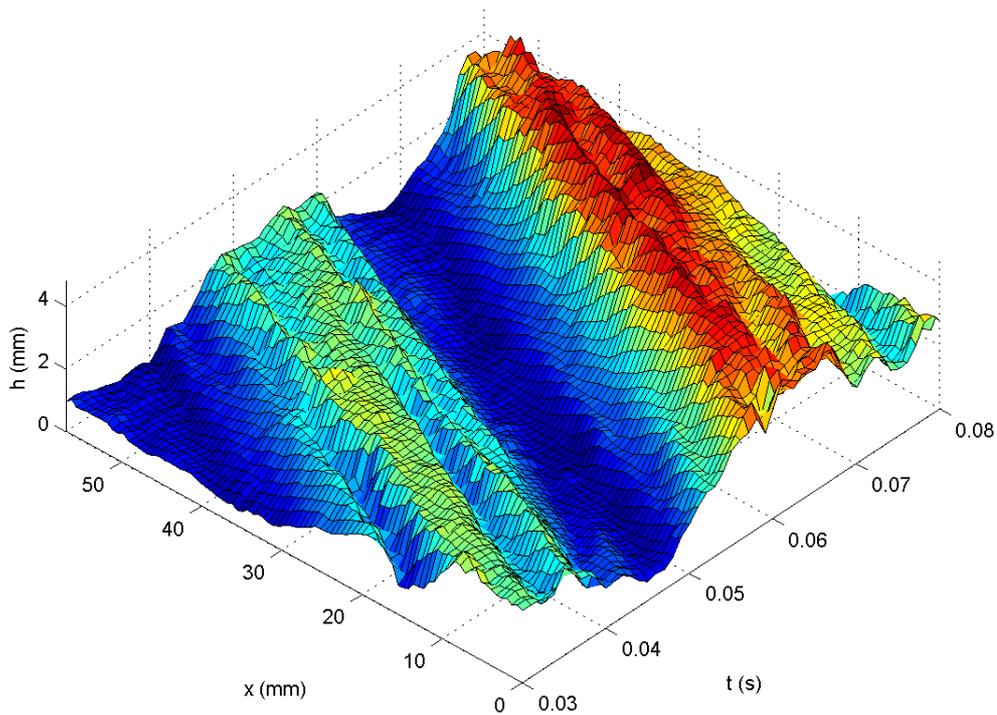


Figura 8.58 - Diagrama espaço-tempo para $U_{sf}=0,1$ m/s e $U_{sg}=30$ m/s para a seção com 50,8 mm de diâmetro interno

8.2. Medidas Transversais do Filme de Líquido

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com a técnica de medição baseada na visualização transversal do filme de líquido descrita no Capítulo 6.

A Figura 8.59 apresenta uma sequência de imagens da seção transversal do escoamento do filme de líquido. 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.

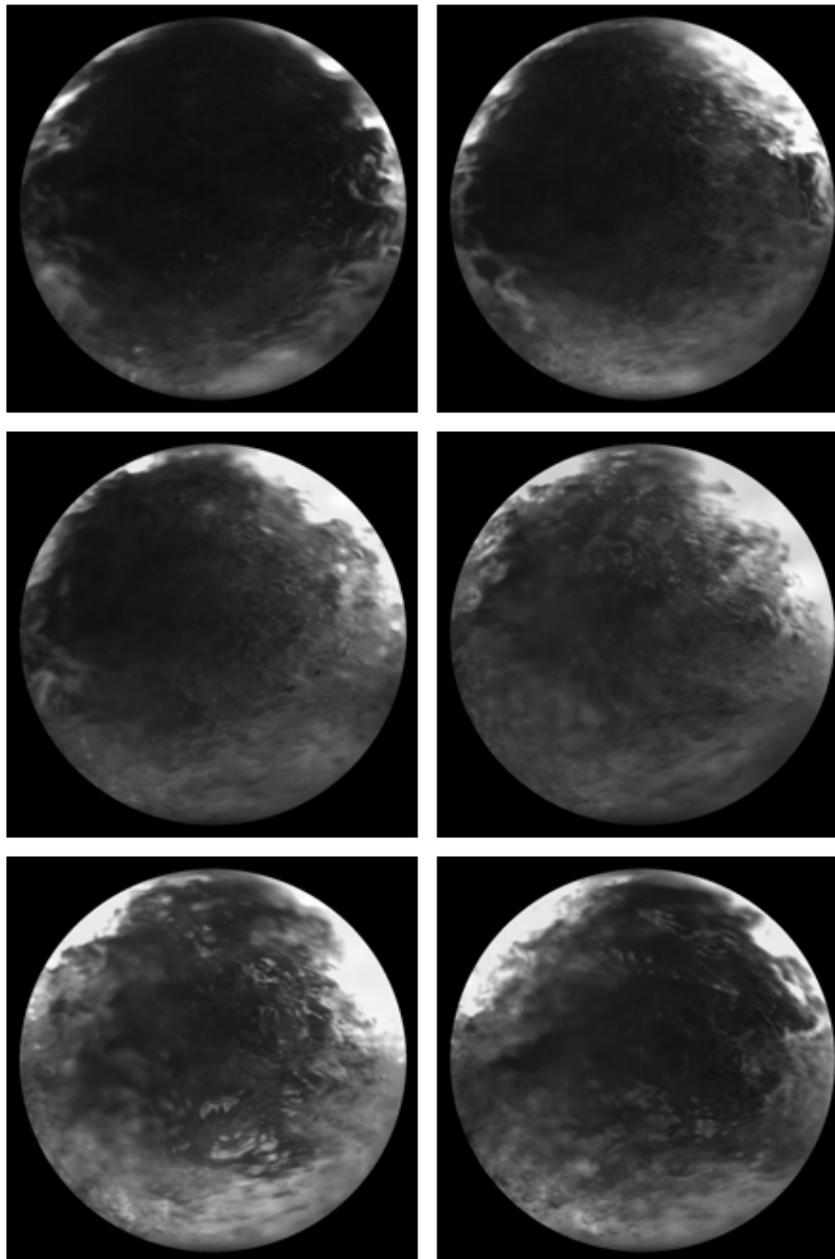


Figura 8.59 - Sequência de magens da seção transversal do escoamento do filme de líquido durante a passagem de uma grande onda para $U_{sg}=20$ m/s e $U_{sf}=0,140$ m/s.

Uma análise qualitativa visual em câmera lenta de uma sequência de imagens como a apresentada na figura permite observar claramente movimentos circunferenciais do filme líquido ao longo das paredes do tubo. Estes movimentos alternam intervalos de escoamento ascendente e descendente, como resultado da passagem de uma grande onda. Estas observações podem auxiliar no entendimento dos mecanismos responsáveis pela sustentação do filme superior de líquido.

A Figura 8.60 (a) e (b) apresenta dois conjuntos de três imagens de filme de líquido obtidas para a mesma velocidade superficial de líquido e para dois valores da velocidade superficial de gás. As imagens permitem avaliar, ainda que de forma sutil na versão impressa, que o filme de líquido se distribui circunferencialmente de modo mais uniforme com o aumento da velocidade o gás, como já comentado anteriormente.

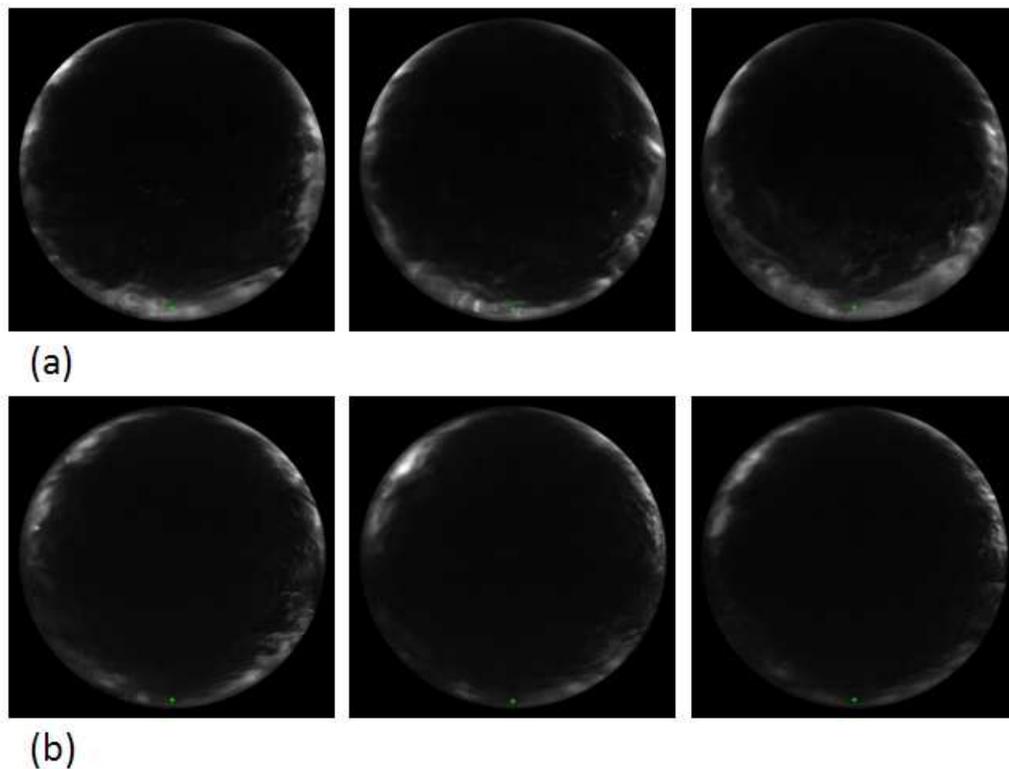


Figura 8.60 - Imagens da distribuição de filme de líquido ao longo da seção transversal

(a) $U_{sg}=20$ m/s e $U_{sl}=0,112$ (b) $U_{sg}=34$ m/s e $U_{sl}=0,112$.

8.2.1. Medição da Espessura de Filme Líquido

A medição instantânea da distribuição circunferencial da espessura do filme de líquido em uma seção transversal pode ser realizada a partir de imagens instantâneas como aquelas apresentadas na Figura 8.59. Para isso, foram utilizadas as técnicas de processamento de imagens apresentadas no Capítulo 6. A Figura 8.61 (a) e (b) apresenta resultados da medição da espessura instantânea de filme ao longo da circunferência do tubo.

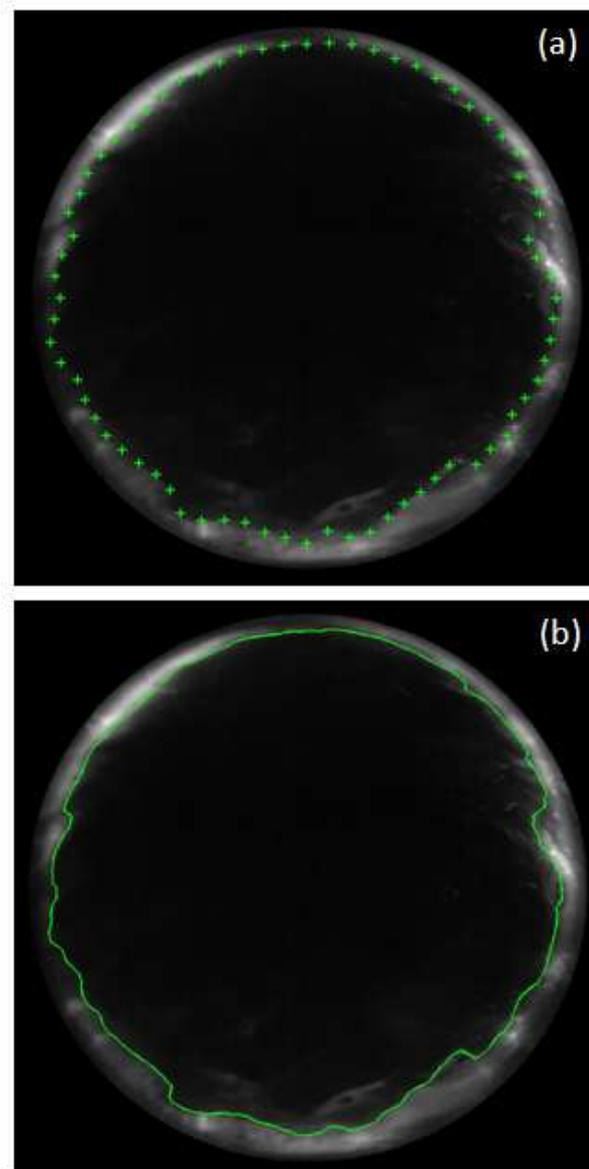


Figura 8.61 – Medição da espessura instantânea de filme ao longo da circunferência do tubo (a) a cada 5° e (b) a cada 1° e ajustadas por uma curva.

Na Figura 8.61(a) as medições foram realizadas a cada 5° enquanto na Figura 8.61(b) as medições foram feitas a cada 1° e ajustadas por uma curva que descreve com clareza a distribuição instantânea do filme de líquido. Resultados como os apresentados nestas figuras ainda não foram publicados na literatura, constituindo-se em uma contribuição original do presente trabalho.

Uma observação cuidadosa das imagens apresentadas na Figura 8.61, mostra que há regiões mal iluminadas que dificultam a medição da espessura do filme em algumas posições circunferenciais. Isto se deve, como já comentado no Capítulo 6, à má distribuição da iluminação proveniente do plano de laser que, nos experimentos conduzidos, incidia por apenas um dos lados da caixa de visualização. Esta limitação está sendo corrigida pela divisão do feixe laser produzindo iluminação simultânea em dois ou mais planos. No momento da preparação do texto desta dissertação, os componentes ópticos necessários para a implementação deste novo arranjo de iluminação ainda não estavam disponíveis, o que impossibilitou a condução de experimentos utilizando a técnica de visualização transversal com uma melhor iluminação.

8.2.2. Comparação entre Medidas na Imagem Longitudinal e Transversal

Apesar das limitações na iluminação mencionadas na seção anterior, foram realizados testes comparativos entre as técnicas de medição utilizando os planos de iluminação longitudinal e transversal. Para isso, a seção transversal do tubo foi iluminada de baixo para cima, garantindo assim uma boa iluminação e definição óptica da interface do filme na geratriz inferior do tubo, posição onde a técnica longitudinal havia sido implementada.

A Figura 8.62 apresenta o resultado para o espectro de potência do sinal de espessura de filme obtido pelas técnicas longitudinal e transversal de medição na geratriz inferior do tubo, para $U_{sg}=20$ m/s e $U_{sf}=0,140$ m/s. Pode-se verificar que a concordância obtida é excelente. Para as condições de escoamento da Figura 8.62, 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.

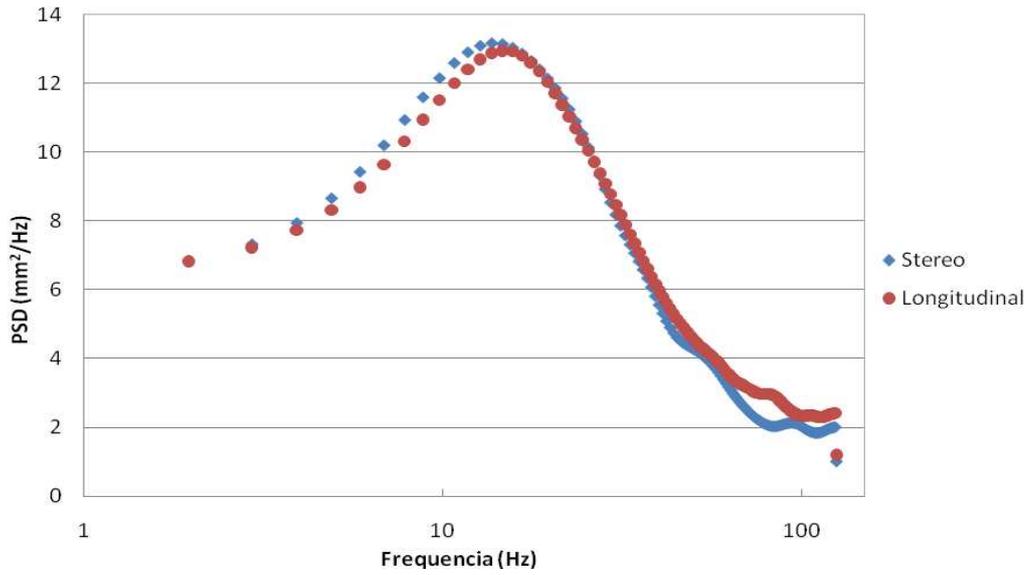


Figura 8.62 - Comparação do espectro de frequências do sinal de espessura de filme de líquido na geratriz inferior do tubo, obtido pelas técnicas longitudinal e transversal, para $U_{sg}=20\text{ m/s}$ e $U_{sl}=0,140\text{ m/s}$.