

ESTUDO DA ESTRUTURA DO ESCOAMENTO BIFÁSICO HORIZONTAL LÍQUIDO-GÁS EM REGIME ANULAR EMPREGANDO MÉTODOS ÓPTICOS

Aluno: Pedro Gabriel Tavares
Orientador: Luis Fernando A. Azevedo

Introdução

O escoamento bifásico horizontal líquido-gás em regime anular é comum em diversas atividades industriais, como por exemplo, em reatores nucleares, evaporadores, condensadores e oleodutos [1] (Bai et al, 1997). Progressos significativos ocorreram nessa área nas últimas décadas, sobretudo em técnicas experimentais e em simulações computacionais. Do ponto de vista da modelagem de um problema bifásico, a previsão do comportamento das interfaces em função da velocidade, pressão, temperatura e das demais grandezas é um grande desafio. Apesar de alguns avanços, o conhecimento acerca do escoamento bifásico ainda é limitado, constituindo um vasto campo para pesquisas teóricas e experimentais.

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.

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 [2] (Schubring and Shedd, 2008).

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, que sofre contínua ação da gravidade.

O objetivo do projeto foi desenvolver uma metodologia de visualização e caracterização do escoamento bifásico horizontal ar-água em regime anular e obter dados relevantes das características predominantes desse escoamento. Para isso, utilizou-se a técnica de Fluorescência Planar Induzida por Laser, PLIF (*Planar Laser Induced Fluorescence*). A partir das imagens capturadas, em conjunto com um algoritmo computacional desenvolvido em MATLAB®, calculou-se a amplitude, velocidade e frequência de passagem das ondas.

Experimento

O PLIF é uma técnica que necessita da iluminação do escoamento por um plano de luz monocromática, e se baseia no princípio de fluorescência. 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 532 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 também 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 540 nm bloqueando a iluminação proveniente do espalhamento de luz na interface líquido-gás. A Figura 1 ilustra o esquema de visualização montado utilizando a técnica PLIF.

Imagens do filme líquido foram capturadas com uma resolução de 512 x 512 pixels a partir de uma câmera digital de alta frequência de aquisição, ID Motion ProX3. Essa câmera era sincronizada a um laser de dupla cavidade e alta taxa de repetição, Nd-YLF laser (Pegasus PIV New Wave). Cada cavidade do laser produzia pulsos com energia máxima de 10mJ, 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.

Para reduzir as distorções ópticas resultantes do efeito de curvatura, foi utilizada uma caixa retangular de visualização, posicionada ao redor do tubo e completamente preenchida com água. Uma vez que o principal objetivo do presente experimento foi medir a espessura do filme líquido próximo à parede da tubulação, foi conveniente utilizar o tubo composto por um material com o índice de refração bem próximo ao da água. Essa condição ideal foi obtida utilizando-se um tubo de FEP (*Fluorinated Ethylene Propylene*), eliminando as distorções ópticas e aumentando a nitidez das imagens [3] (Rodriguez e Shedd, 2004).

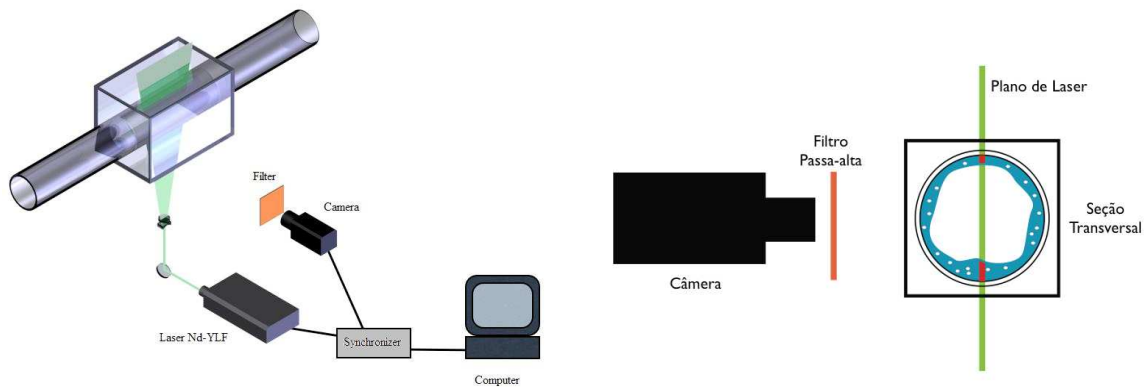


Figura 1-Visão esquemática da seção para experimentos usando a técnica PLIF

A técnica de visualização empregada exige também uma montagem óptica especial para que possa ser aplicada com sucesso. A Figura 2 apresenta uma visão geral da bancada de testes. A caixa de visualização, a fonte de laser e câmera podem ser vistos no final da seção. A câmera foi montada em uma mesa de coordenada tri axial fixada na bancada do lado oposto ao laser. Com isso, todos os componentes eram fixados à mesma bancada, mantendo assim o nível e a ortogonalidade necessários para uma visualização precisa. Um espelho foi posicionado a 45° em baixo da caixa de visualização. Esse arranjo garantia que o feixe de laser era direcionado de baixo para cima, incidindo o plano paralelamente a tubulação.

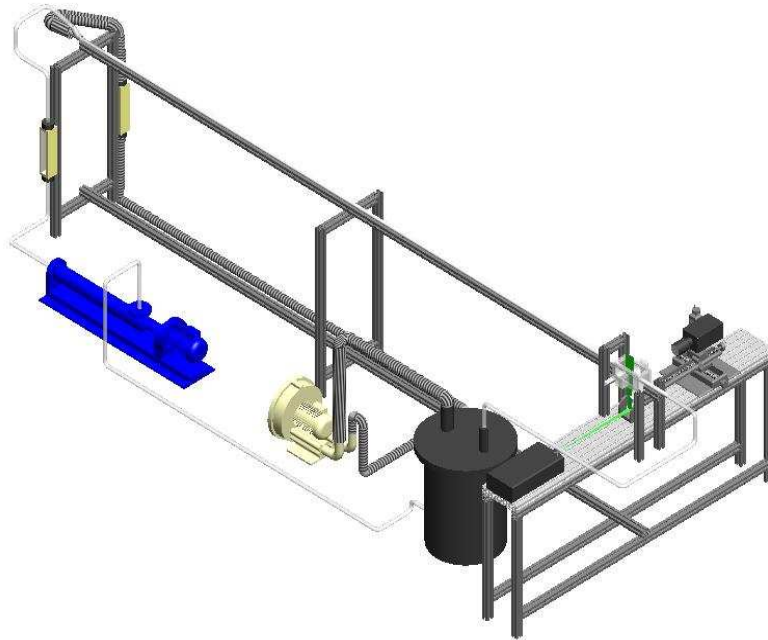


Figura 2 - Visão geral da seção usada no experimento

A água com Rhodamina B e ar à temperatura ambiente e pressão atmosférica foram usados como fluidos de trabalho. A seção de teste era composta 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 de FEP. 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 entravam na tubulação por um misturador na forma de “T”. Os dois fluidos escoavam em uma seção com diâmetro de 15.8 mm e um comprimento 4 metros, onde o padrão de escoamento anular era desenvolvido. 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.

Em cada experimento realizado, caracterizado por um par de vazões de líquido e gás, eram capturadas um total de 13100 imagens com uma frequência de aquisição de 3000 Hz. O tempo de aquisição era limitado pela capacidade de memória da câmera. É importante mencionar que alguns testes preliminares com diferentes taxas de aquisição foram realizados com o objetivo de definir qual a melhor frequência de aquisição das imagens que permitisse capturar as frequências de onda de interesse com uma resolução espacial adequada e com uma energia de pulso suficiente para induzir fluorescência. A frequência de 3000 Hz foi a que apresentou melhores resultados, fornecendo imagens com um nível de intensidade luminosa considerado satisfatório.

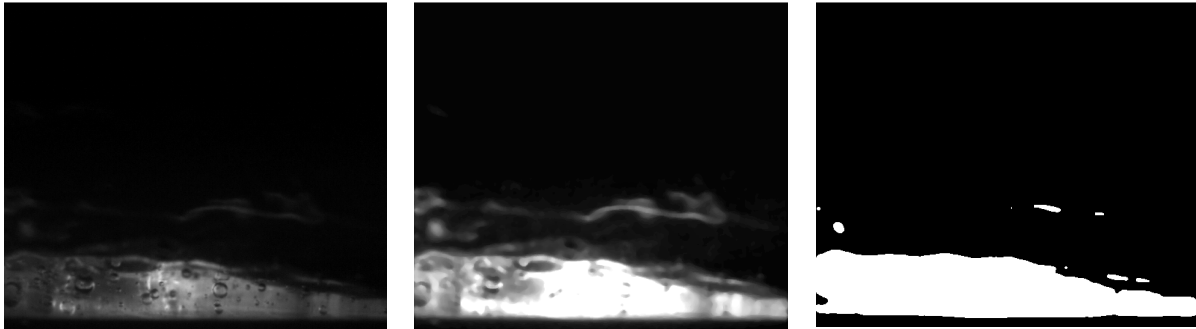
Para o processamento digital das imagens, foi desenvolvida uma rotina computacional em MATLAB[®], responsável por realçar e binarizar as imagens. Para a redução de ruído nas imagens e preservação dos contornos do filme de líquido, utilizou-se um filtro mediano 3x3. Em seguida, um algoritmo de equalização do histograma foi aplicado para realçar o contraste.

As imagens resultantes dos processamentos anteriores, finalmente passavam por um processo de binarização usando um valor adequado como limiar.

As imagens binarizadas eram fornecidas a um algoritmo computacional onde a interface líquido-gás era automaticamente identificada em dois diferentes pontos, para cada imagem obtida. Essas duas sondas digitais, com um espaçamento axial conhecido, geravam

informações da espessura do filme líquido inferior em função do tempo. A transformada de Fourier do sinal da amplitude do filme líquido em função do tempo era obtida, produzindo o espectro de energia do sinal. A velocidade da onda foi determinada computando o atraso correspondente a melhor correlação entre os dois sinais de amplitude do filme líquido e da informação sobre a distância axial entre as sondas.

A Figura 3 mostra uma imagem instantânea longitudinal típica do filme líquido inferior, uma imagem processada e uma binarizada para um determinado par de vazões líquido-gás.



(a) (b) (c)
Figura 3 - Típica imagem do filme líquido inferior: (a) imagem original (b) imagem filtrada (c) imagem binarizada

A Figura 4 é uma imagem original, onde os pontos vermelho e azul são as espessuras calculadas pelo algoritmo computacional para as duas sondas. Essa figura mostra como o código desenvolvido consegue identificar perfeitamente a interface líquido-gás.



Figura 4 - Evolução do filme líquido inferior

Resultados

Resultados do filme líquido inferior foram coletados para diferentes vazões de líquido e gás. Com base na revisão bibliográfica, os resultados do presente experimento pretendem confirmar as previsões já realizadas por outros autores e adicionar novas informações acerca desse tipo de escoamento.

Usando a técnica óptica descrita anteriormente, a espessura do filme líquido inferior foi estimada para cada par de vazões. Rodriguez e Shedd (2004) demonstraram, por comparações com as medições diretas do filme usando técnica PLIF, que este método óptico determina com precisão a espessura média de filme líquido entre grandes ondas. Na Tabela 1 as condições experimentais e algumas medições de espessura de filme realizadas estão resumidas. U_{sl} e U_{sg} são as velocidades superficiais do líquido e do gás respectivamente e h é a espessura média do filme líquido.

Tabela 1- Espessura média do filme líquido em função do tempo

U_{sl} (m/s)	U_{sg} (m/s)	h (mm)	U_{sg} (m/s)	U_{sl} (m/s)	h (mm)
0.06	15	1.31	20	0.06	1.04
0.06	20	1.04	20	0.08	1.10
0.06	28	0.61	20	0.14	1.37
0.06	34	0.55	22	0.08	0.88
0.06	47	0.29	22	0.14	1.10
0.08	20	1.10	24	0.08	0.95
0.08	24	0.94	24	0.16	0.97
0.08	28	0.71	24	0.24	1.23
0.08	34	0.65	28	0.06	0.61
0.14	20	1.37	28	0.14	0.65
0.14	22	1.10	47	0.06	0.29
0.14	28	0.65			

A drástica redução do filme líquido com o aumento da velocidade superficial do gás é evidente. No entanto, o efeito do aumento da velocidade superficial do líquido sobre espessura média do filme é significativo somente para vazões baixas de gás. A Figura 5 mostra o efeito do aumento da velocidade superficial do líquido e do gás na espessura do filme líquido. É nítido um aumento da amplitude das ondas para baixas vazões de gás.

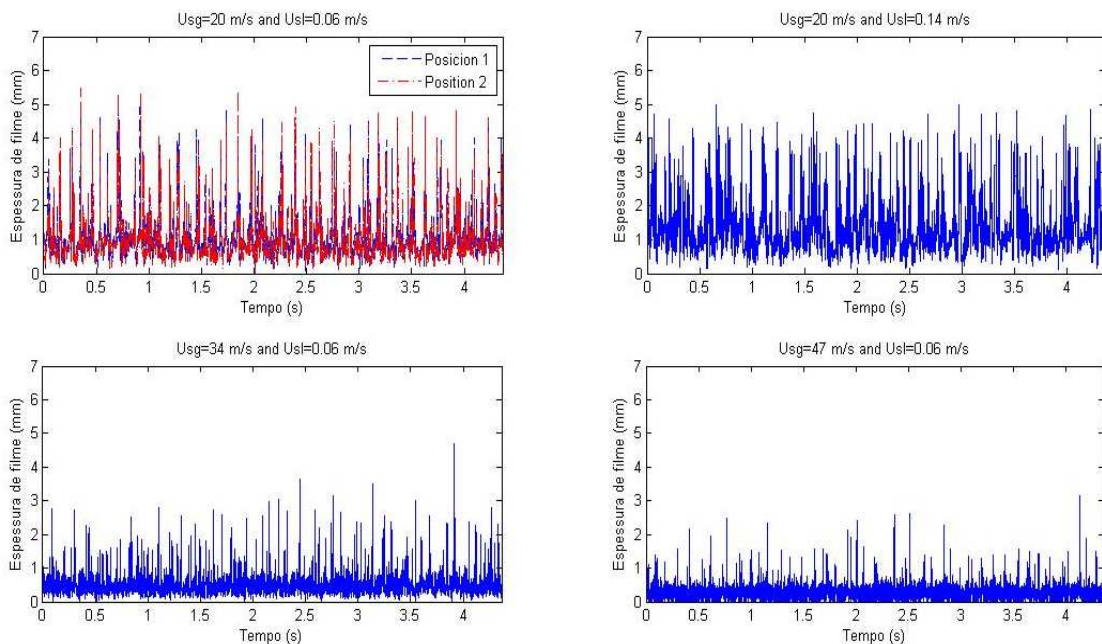


Figura 5 – Espessura do filme líquido em função do tempo

Um método, semelhante ao relatado por Schubring et al. (2008), foi utilizado para estudar a frequência e velocidade das ondas. O espectro de energia foi obtido através da análise individual do sinal da espessura do filme, utilizando a Transformada de Fourier. A Figura 6 apresenta um resultado da análise espectral realizada sobre a espessura de filme. A Figura 7 apresenta os resultados da análise espectral normalizada pela energia máxima.

Para uma velocidade superficial líquida fixa, ao aumentar a velocidade superficial do gás, o espectro tende a distribuir a energia para frequências maiores de passagem de onda. Além

disso, o espectro tem um comportamento de achatamento com o aumento de U_{sg} , devido a uma distribuição de energia das ondas por uma faixa mais ampla de frequência.

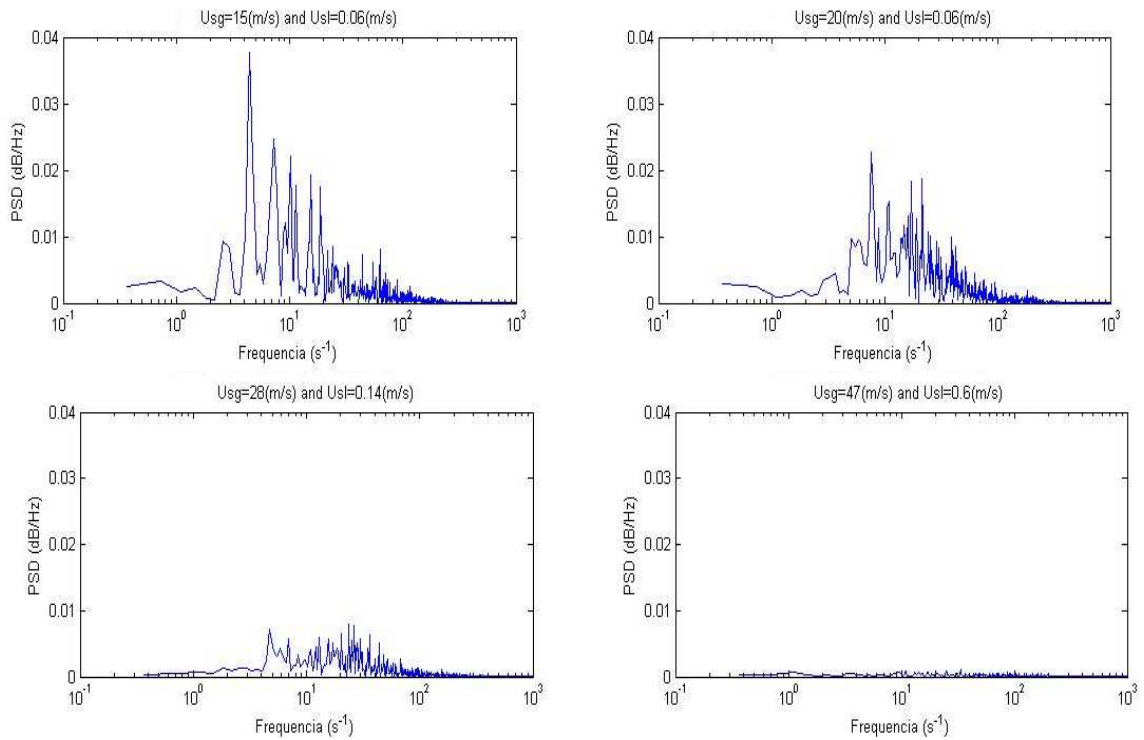


Figura 6 - Densidade espectral

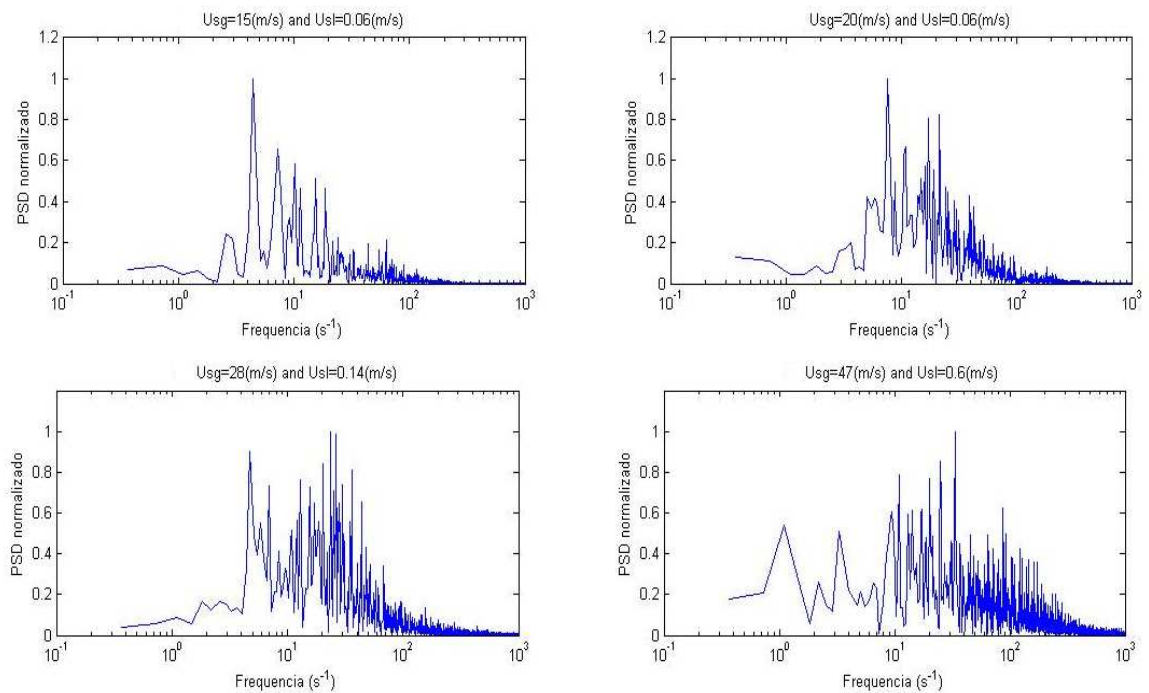


Figura 7 - Densidade espectral normalizada

A partir da correlação cruzada de dois sinais simultâneos de espessura de filme localizados em posições axiais distantes de 100 pixels, a velocidade da onda, U_w , foi obtida. Os resultados são resumidos na Tab.2. O aumento sistemático do U_w com aumento da velocidade superficial de gás e do líquido é nítido.

Tabela 2 – Velocidade de onda

U_{sg} (m/s)	20	20	20	24	28	34
U_{sl} (m/s)	0.06	0.08	0.14	0.08	0.08	0.08
U_w (m/s)	1.66	2.02	2.32	2.35	2.46	2.57

Conclusão

Com base nos resultados da aplicação bem sucedida da técnica de PLIF no filme formado pelo escoamento anular horizontal, pode-se afirmar que foi possível realizar visualizações muito nítidas na interface líquido-gás. Além disso, a rotina computacional desenvolvida em MATLAB[®] permitiu o processamento das imagens e a extração dos parâmetros de interesse, como espessura de filme, frequência e velocidade das ondas.

O presente estudo valida a aplicação da técnica óptica de visualização baseado na fluorescência induzida por laser e representa um avanço nos estudos experimentais quantitativos e qualitativos de escoamentos bifásicos em regime anular.

Referencias Bibliográficas

- 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- Schubring, D. and Shedd, T.A., 2008. “Wave behavior in horizontal annular air – water flow”, International Journal of Multiphase Flow, Vol.34, pp. 636-646.
- 3- Rodriguez, D.J. and Shedd, T.A., 2004, “Cross-Sectional imaging of the liquid film in horizontal two-phase annular flow”, Proceedings of ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference, Vol.1, Charlotte, North Carolina, USA, pp. 1-8
- 4- Jayanti, S., Hewitt, G.F., White, S.P., 1990, “Time-Dependent behavior of the liquid film in horizontal annular flow”, International Journal Multiphase Flow, Vol.16, No. 6, pp. 1097-1116