

2015 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2015
São Paulo, SP, Brazil, October 4-9, 2015
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR - ABEN
ISBN: 978-85-99141-06-9

ESTUDO EXPERIMENTAL DO MOVIMENTO DE BOLHAS ALONGADAS INDIVIDUAIS EM TUBOS VERTICAL E LIGEIRAMENTE INCLINADOS USANDO UMA TÉCNICA DE VISUALIZAÇÃO

Nathália N. Araújo¹, Pedro A. M. Vinhas³, Marcos B. de Azevedo^{2,3},
José L. H. Faccini² e Jian Su³

¹Departamento de Engenharia Nuclear - Escola Politécnica
Universidade Federal do Rio de Janeiro
21941-909, Rio de Janeiro - RJ - Brasil
nathalianunes@poli.ufrj.br
pvinhas@nuclear.ufrj.br

²Instituto de Engenharia Nuclear (IEN / CNEN)
21941-906, Rio de Janeiro - RJ - Brasil
bertrand@ien.gov.br
faccini@ien.gov.br

³Programa de Engenharia Nuclear, COPPE
Universidade do Federal do Rio de Janeiro
21941-972, Rio de Janeiro - RJ - Brasil
sujian@lasme.coppe.ufrj.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental de bolhas de Taylor ascendentes em tubos vertical e ligeiramente inclinados contendo um líquido estagnado, utilizando uma técnica de visualização. Foi utilizada uma montagem experimental que consistiu de um tubo de acrílico de seção circular com 2 m de comprimento e 24 mm de diâmetro interno, com as extremidades vedadas e contendo diferentes misturas de água destilada e glicerina (água pura, 80% de água, 50% de água, 20% de água e glicerina pura). Durante o enchimento do tubo com as misturas, foram deixados bolsões de ar com comprimentos de 10 cm e 20 cm para geração das bolhas de Taylor, que foram obtidas invertendo-se o tubo até a posição desejada. O tubo foi fixado em um dispositivo que permitiu variar os ângulos de inclinação em 0°/2,5°/5°/7,5°/10°/15° em relação à vertical. O estudo experimental consistiu na verificação da influência da inclinação e das propriedades do fluido, em especial a viscosidade, nas velocidades e nos comprimentos das bolhas de Taylor, empregando-se uma câmera de vídeo de alta velocidade para a medição destes parâmetros. O processamento das imagens foi realizado utilizando-se um software comercial e um programa desenvolvido no Laboratório de Termo-Hidráulica Experimental do Instituto de Engenharia Nuclear (LTE/IEN). Os resultados obtidos indicaram que as velocidades de ascensão das bolhas diminuíram com o aumento da viscosidade do líquido, e aumentaram com o aumento da inclinação do tubo.

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda de energia mundial, fontes alternativas de energia, como a energia proveniente da indústria nuclear, estão sendo cada vez mais exploradas.

Os reatores utilizados nas centrais nucleares possuem escoamentos principalmente na horizontal e vertical, porém a liberdade de movimento dos reatores encontrados em navios e

submarinos faz com que a compreensão dos escoamentos em tubos inclinados ganhe importância.

A Marinha do Brasil está desenvolvendo submarinos que utilizarão reatores nucleares para a sua propulsão. O Brasil possui atualmente quatro reatores de pesquisa em funcionamento e dois reatores de potência para geração nucleoe elétrica.

Escoamentos multifásicos são encontrados em diversas indústrias, como nuclear, petróleo e química. Na primeira, a água usada em reatores nucleares como moderador e/ou refrigerante, pode entrar em ebulição, transformando o reator em um sistema bifásico água-vapor. Assim, compreender-se a estrutura desse sistema e como as fases nele se distribuem é importante, entre outros fenômenos, para compreender-se o processo de troca de calor e, conseqüentemente, para o efetivo controle do reator.

As bolhas de Taylor ocorrem no padrão de escoamento conhecido como intermitente de bolhas alongadas (*slug flow*) e apresentam um nariz, um corpo e uma cauda bem definidos, que dão a elas um formato semelhante ao de um projétil, e uma esteira de bolhas menores, como ilustrado na Fig. 1.

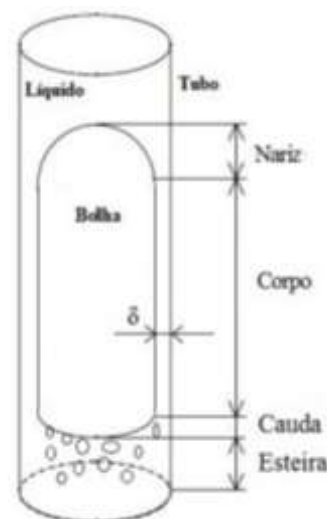


Figura 1: Esquema de uma bolha de Taylor ascendendo em um tubo vertical.

A influência da inclinação do tubo na propagação da bolha alongada é complexa, pois essa causa uma mudança na geometria da bolha. Dumitrescu [1] e Davies e Taylor [2] propuseram, e comprovaram experimentalmente, que em escoamentos verticais, a bolha apresenta uma simetria em relação ao eixo do tubo e possui o nariz em um formato semiesférico. Conforme ocorre a inclinação, a bolha perde essa simetria e o nariz tem a sua forma alterada.

Nicklin et al. [3] estudaram a ascensão de bolhas de Taylor para líquido estagnado em tubos verticais e propuseram uma correlação para estimar a velocidade de ascensão dessas bolhas:

$$U_b = 0,35\sqrt{gDi}, \quad (1)$$

onde Di é o diâmetro interno do tubo e g é o valor da aceleração da gravidade.

Zukoski [4] foi um dos pioneiros no estudo da influência do ângulo de inclinação nos parâmetros interfaciais de bolhas de Taylor. Em tubos fechados contendo líquido estagnado, esse autor identificou que a velocidade da bolha cresce com o aumento do ângulo de inclinação em relação a vertical, atinge um valor máximo entre os ângulos de 40° e 60° e depois decresce até atingir a posição horizontal. Ele também verificou que a velocidade de propagação não depende do comprimento da bolha se o comprimento da mesma for maior do que três o raio do tubo.

Bendtsen [5] realizou uma série de experimentos para determinar o efeito da inclinação do tubo sobre a velocidade das bolhas de Taylor. Os resultados obtidos apresentaram a mesma tendência qualitativa, observada por Zukoski [4], para a influência do ângulo de inclinação sobre a velocidade das bolhas. Bendtsen [5], então, propôs uma correlação para estimar a velocidade da bolha ascendendo em tubos inclinados contendo líquido estagnado. Tal correlação é escrita em função do número adimensional de Froude ($Fr = Ub/\sqrt{gDi}$) e tendo a posição vertical como referência (0°):

$$Fr(\theta) = Fr_V \cos \theta + Fr_H \sin \theta, \quad (2)$$

onde θ é o ângulo de inclinação, Fr_V o número de Froude para o caso vertical e Fr_H é o número de Froude para o caso horizontal.

Weber et al. [6] estudaram a velocidade de bolhas alongadas ascendentes em líquido estagnado em tubos verticais e inclinados em $0^\circ/15^\circ/45^\circ/60^\circ/90^\circ$ com relação a vertical e verificaram que a correlação de Bendtsen [5] era capaz de estimar adequadamente o valor de Fr , enquanto $Fr_H \geq Fr_V$. Eles propuseram, então, um termo de correção para a correlação de Bendtsen [5], que ampliaria a sua faixa de aplicação, incluindo os casos onde $Fr_H < Fr_V$.

Este trabalho estuda a influência da inclinação e das propriedades dos fluidos, especialmente da viscosidade, na dinâmica de bolhas alongadas individuais subindo em tubos vertical e ligeiramente inclinados, selados nas extremidades e contendo líquido estagnado. As velocidades de propagação e os comprimentos das bolhas foram determinados por meio do processamento de imagens obtidas através de uma câmera de vídeo de alta velocidade, usando-se dois softwares diferentes.

2. MONTAGEM EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Termo-Hidráulica Experimental do Instituto de Engenharia Nuclear (LTE/IEN/CNEN).

A montagem experimental consistiu de um tubo de acrílico de seção circular com 2 m de comprimento e 24 mm de diâmetro interno. As extremidades do tubo foram vedadas e

fixadas em um suporte de metal, alinhado ao tubo, que permite variar os ângulos de inclinação.

O tubo foi parcialmente cheio com diferentes misturas de água destilada e glicerina (água pura, 80% de água, 50% de água, 20% de água e glicerina pura), deixando-se, em seu topo, bolsões de ar com comprimentos de 10 cm e 20 cm para a geração das bolhas, que foram obtidas invertendo o tubo até a posição desejada (t_1 para t_2), conforme apresentado na Fig. 2. Os ângulos de inclinação estudados foram $0^\circ/2,5^\circ/5^\circ/7,5^\circ/10^\circ/15^\circ$, em relação à vertical.

O sistema de visualização era composto de uma câmera de vídeo de alta velocidade (Olympus I-SPEED 2), lentes de aumento, um software de aquisição e análise de imagem e um laptop. A câmera possui uma resolução mínima de 160×120 pixels e máxima de 800×600 pixels, com taxa de filmagem máxima de 33000 quadros por segundo e mínima de 60 quadros por segundo. A câmera foi fixada em um suporte adequado e posicionada paralelamente ao solo. As sequências de imagens foram gravadas em arquivos tipo AVI e usadas posteriormente para a análise da sequência de movimento das bolhas.

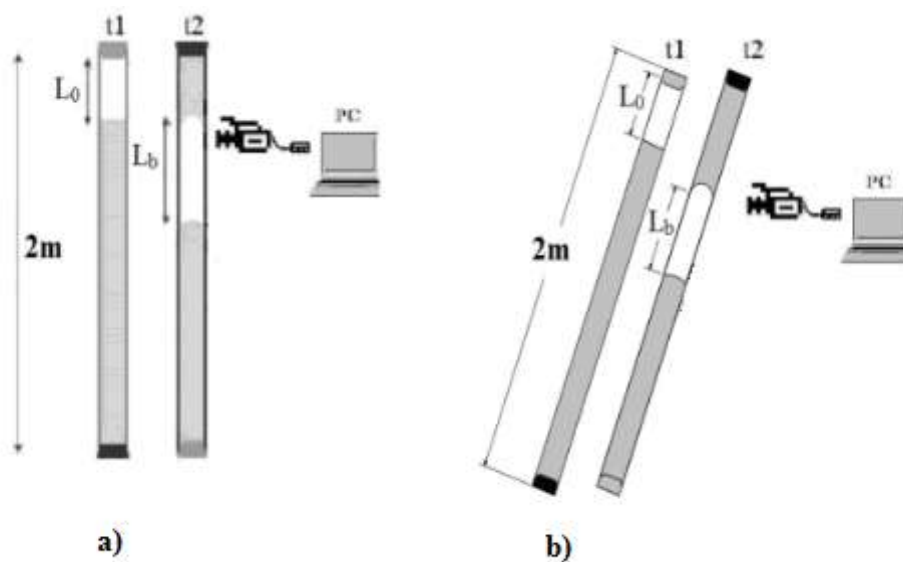


Figura 2: Representação Esquemática da coluna de líquido estagnado: a) vertical e b) levemente inclinada.

3. METODOLOGIA

3.1 Processamentos pelo software Olympus I-SPEED 2

O software comercial *Olympus I-Speed Software Suite* apresenta um par de eixos, que permite determinar a posição e a velocidade de um ponto em relação a uma referência calibrada. O processamento das imagens consiste em determinar um ponto de referência na interface gás-líquido, como, por exemplo, o nariz da bolha. Avançando-se um intervalo de quadros, o ponto de referência é identificado na nova posição, permitindo que o programa calcule o

deslocamento e a velocidade desse ponto ou dessa interface. Fig. 3 apresenta uma tela do programa de análise de imagem usado para processar os filmes gravados, contendo os deslocamentos do nariz da bolha, escolhido como ponto de referência.

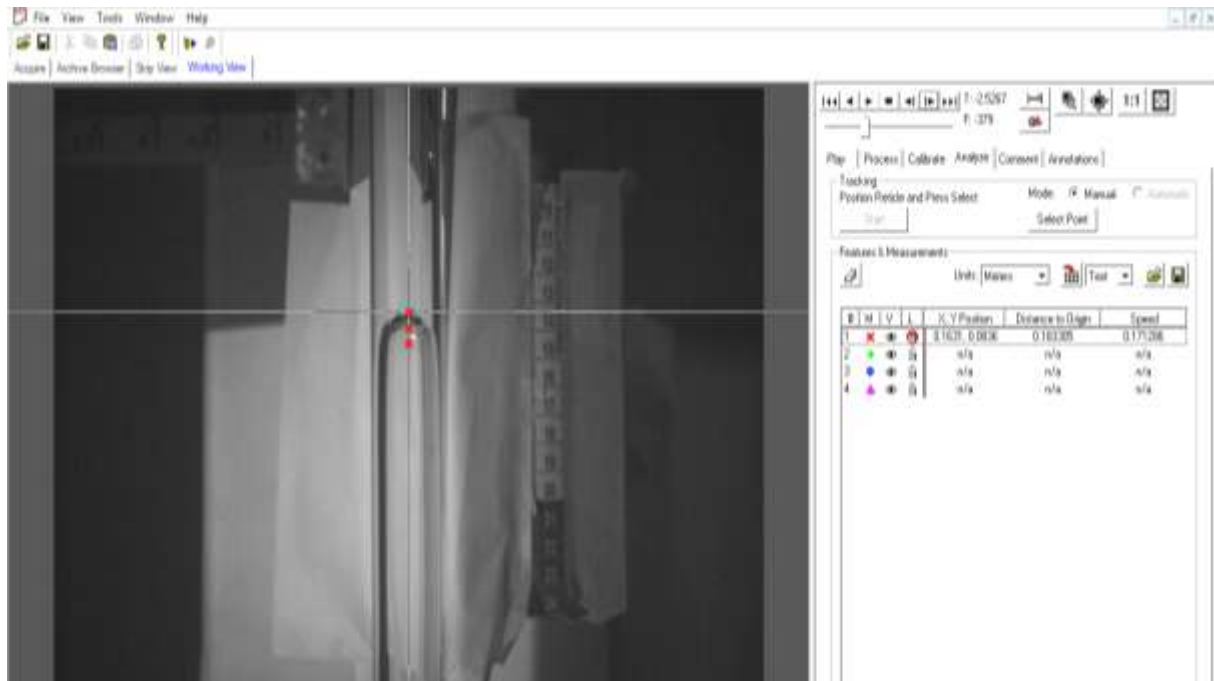


Figura 3. Tela do software comercial de processamento de imagens.

O programa calcula automaticamente as velocidades medidas entre cada dois pontos de referência, em metros/segundo e gera uma planilha do tipo XLS. Foram utilizadas em média 15 marcações sobre o nariz da bolha. No processamento dos escoamentos inclinados, utiliza-se uma linha na direção do eixo do tubo, vide Fig. 4, traçada usando-se o próprio software, para melhor precisão na marcação dos pontos. A velocidade média ascendente da bolha alongada foi obtida calculando-se a média das velocidades entre cada par de pontos de referência.

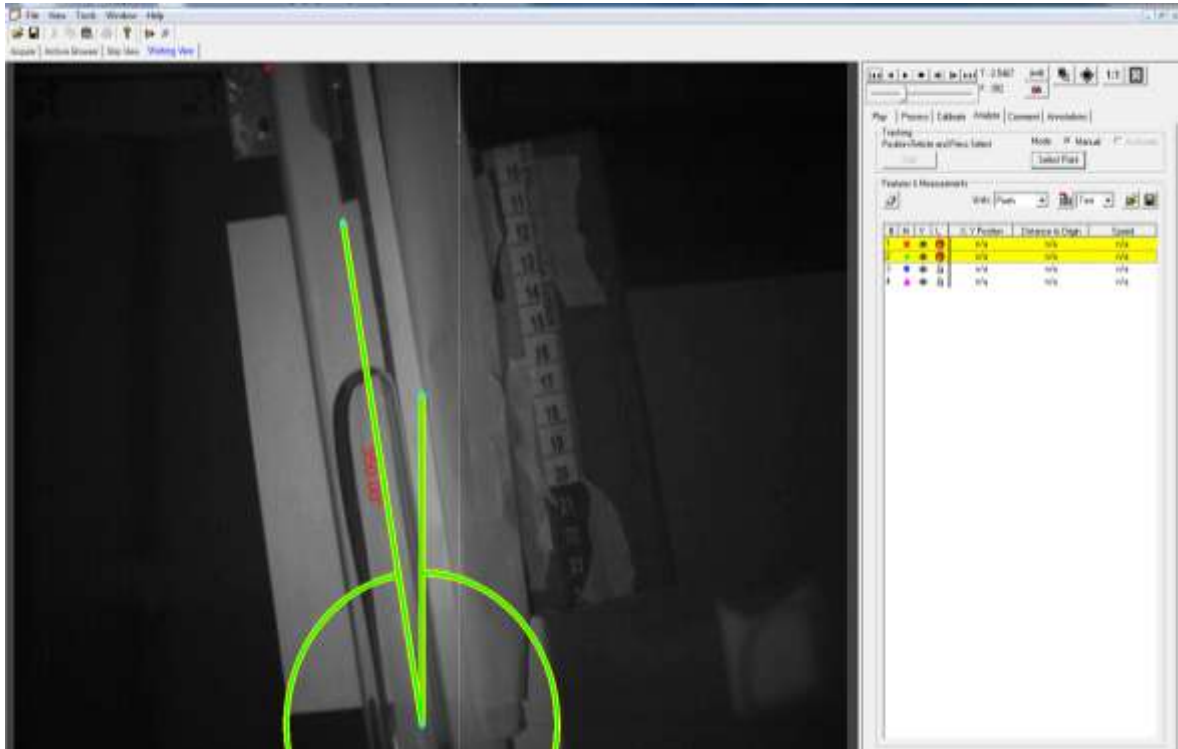


Figura 4: Layout do software comercial Olympus I-Speed Software Suite.

O procedimento de calibração do sistema é realizado marcando-se dois pontos sobre uma referência externa, fixada paralelamente ao tubo, e fornecendo a distância entre eles. O programa retorna, então, a calibração em pixel/metro.

Para determinar o comprimento da bolha de Taylor, utiliza-se a equação:

$$L_b = \Delta q U_b / F_{fps} \quad (3)$$

onde F_{fps} representa a taxa de filmagem e Δq o número de quadros até que a cauda da bolha atinja a mesma posição do nariz na matriz de pixel.

3.2 Processamentos através de aplicativo desenvolvido em Matlab

O processamento utilizando um aplicativo desenvolvido em Matlab no LTE/IEN/CNEN consiste em converter os filmes das bolhas alongadas do tipo AVI em matrizes binárias de colunas de pixels. O valor 1 representa a cor branca que caracteriza as bolhas e o valor 0 representa a cor preta que caracteriza o restante da imagem. O Matlab identifica, utilizando matrizes, o primeiro objeto de maior comprimento no quadro como sendo a bolha. Oito regiões são definidas para o cálculo da velocidade de ascensão, contudo somente se a bolha passar por, pelo menos, cinco dessas regiões, a posição e o tempo de propagação desta são considerados.

O software Matlab utiliza a calibração realizada através do software comercial *Olympus I-Speed Software Suite*. Fig. 5 apresenta a tela do aplicativo desenvolvido em Matlab. Os vídeos

podem ser carregados em grupos ou separadamente. Os valores de diferença, erosão e dilatação são fornecidos pelo usuário do programa afim de melhor eliminar os ruídos. A posição inicial e final do tubo são obtidas através do software comercial da Olympus, realizando uma marcação sobre as extremidades do tubo, conforme mostrado na Fig. 4.

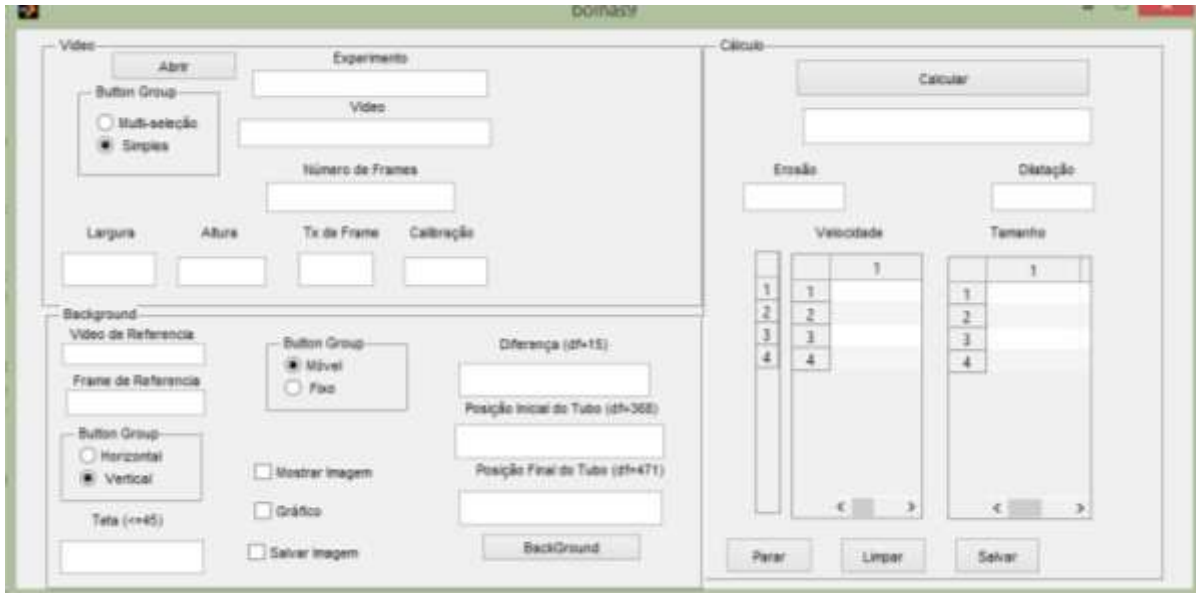


Figura 5: Layout do programa desenvolvido em Matlab.

A velocidade de ascensão da bolha é definida pelo coeficiente linear da relação posição vs tempo. O comprimento é obtido pelo produto da velocidade pelo tempo de permanência da bolha em cada uma das regiões. O software, ao final do processamento, disponibiliza uma planilha tipo XLS com os valores das velocidades e comprimentos de cada bolha de Taylor.

4. RESULTADOS

Os resultados apresentados compreendem a análise de imagens de aproximadamente 600 bolhas ascendendo em diferentes condições. No caso da glicerina pura, a gravação foi realizada a uma taxa de 60 quadros por segundo (fps), devido ao tempo de ascensão da bolha. Já para os demais fluidos foi utilizada uma taxa de 150fps.

Tab. 1 apresenta os líquidos utilizados, suas densidades (ρ), suas viscosidades dinâmicas (μ), bem como os valores calculados do número adimensional inverso da viscosidade ($Nf = \rho\sqrt{gDi^3}/\mu$).

As propriedades do fluido foram calculadas através de correlações propostas por Cheng [7], que calculam o valor de ρ e μ das misturas de glicerina em água na gama de 0 a 100% e temperaturas variando de 0 a 100 ° C.

Tabela 1: Condições Experimentais

Fluido	ρ (kg/m ³)	μ (N.s/m ²)	N_f
100% Água	997	0,0009	12900
80% Água	1060	0,0017	7321
50% Água	1144	0,0068	1952
20% Água	1217	0,0629	224
100% Glicerina	1261	0,9875	15

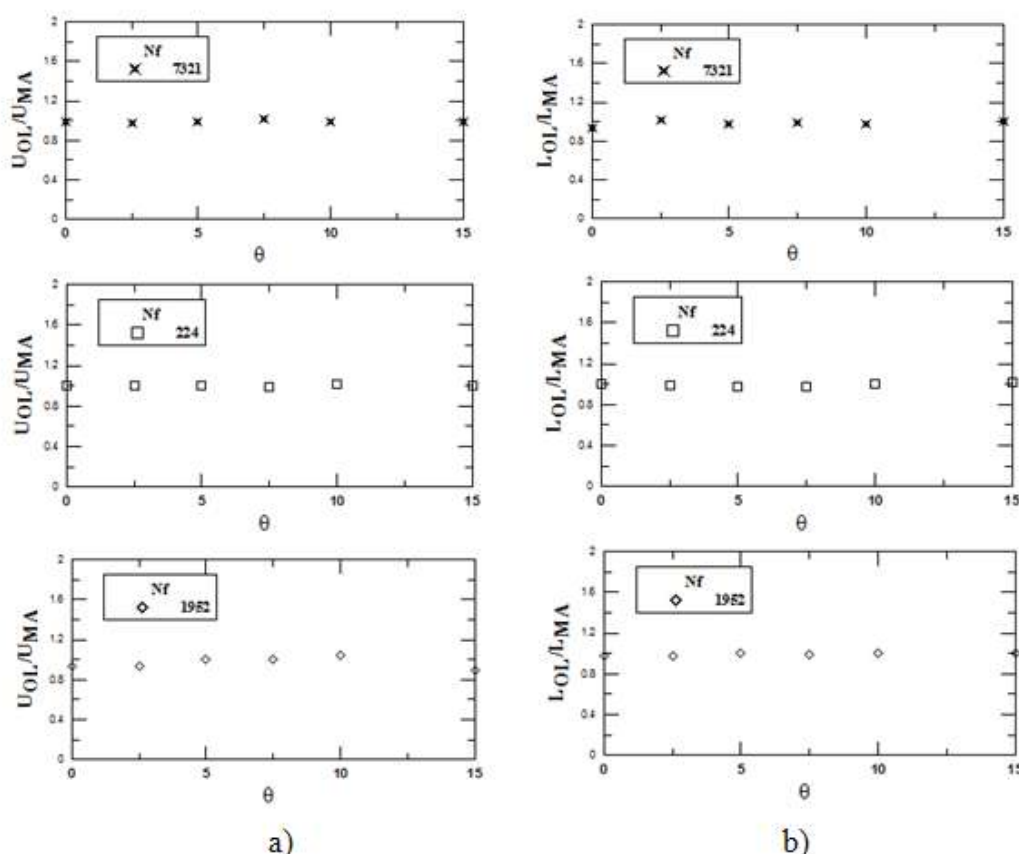


Figura 6: Razão entre os valores do processamento por meio do software Olympus e por meio do aplicativo do Matlab a) da velocidade e b) do comprimento.

Fig. 6 apresenta a razão das velocidades e dos comprimentos obtidos através do processamento com o software comercial (U_{OL} e L_{OL}) e com o aplicativo desenvolvido em Matlab (U_{MA} e L_{MA}) em função do ângulo de inclinação θ para bolhas geradas a partir de bolsões de ar $L_0 = 20$ cm. Verifica-se, pelas figuras, que a diferença entre os valores obtidos através dos dois processamentos, tanto para velocidade quanto para comprimento das bolhas é pequena, com os valores próximos da unidade. Dessa forma, pode-se dizer que o aplicativo desenvolvido no LTE/IEN/CNEN se mostrou confiável na determinação dos parâmetros desejados (U_b e L_b). Para os trabalhos desenvolvidos no LTE/IEN, esse aplicativo apresenta vantagens em relação ao programa comercial da Olympus, uma vez que sua utilização é mais simples e menos trabalhosa, o que acaba por reduzir o tempo de processamento.

Os resultados apresentados, e discutidos, na sequência desse trabalho corresponderão, então, àqueles valores determinados através do processamento por meio do aplicativo desenvolvido no Matlab.

Analisando os resultados das medições dos comprimentos das bolhas nas Fig. 7 e 8, pode ser observado que as bolhas geradas por um mesmo bolsão de ar L_0 possuem comprimentos diferentes nos diferentes fluidos. Os maiores valores de comprimentos são encontrados nos fluidos mais viscosos e esse valor tende a diminuir com o aumento de N_f , para todas as inclinações.

Alguns trabalhos na literatura verificaram que o aumento da viscosidade implica em um aumento na espessura do filme líquido em torno das bolhas de Taylor ascendendo verticalmente. Isso significa dizer que as bolhas se tornam mais estreitas e, com isso, elas tendem a aumentar os seus comprimentos com o objetivo de preservar o seu volume (Nogueira et al.[8], Llewellyn et al.[9] e De Azevedo et al.[10]). Isso justificaria o aumento do comprimento com o aumento da viscosidade.

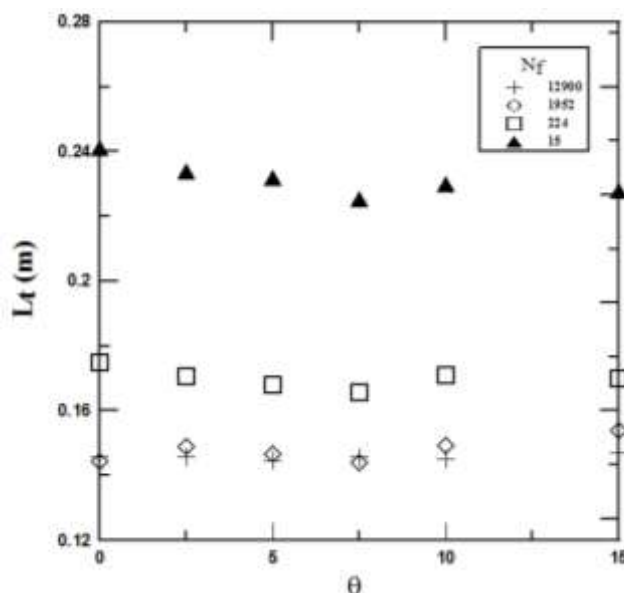


Figura 7: Comprimentos das bolhas de Taylor, geradas a partir de um bolsão de ar $L_0 = 10$ cm, em função do ângulo de inclinação, para as diferentes misturas.

Figs. 9 e 10 mostram a relação entre o número de Froude e o ângulo de inclinação para bolhas geradas a partir de $L_0 = 10$ cm e $L_0 = 20$ cm, para diferentes líquidos. Em tais figuras é possível observar-se o aumento da velocidade com o aumento do ângulo de inclinação, a partir da posição vertical, para todos os líquidos estudados, o que está em concordância com as observações feitas por Zukoski[4], Bendiksen [5] e Weber et al.[5]. Verifica-se também que, quanto mais viscoso o líquido, menor foi a velocidade de ascensão das bolhas.

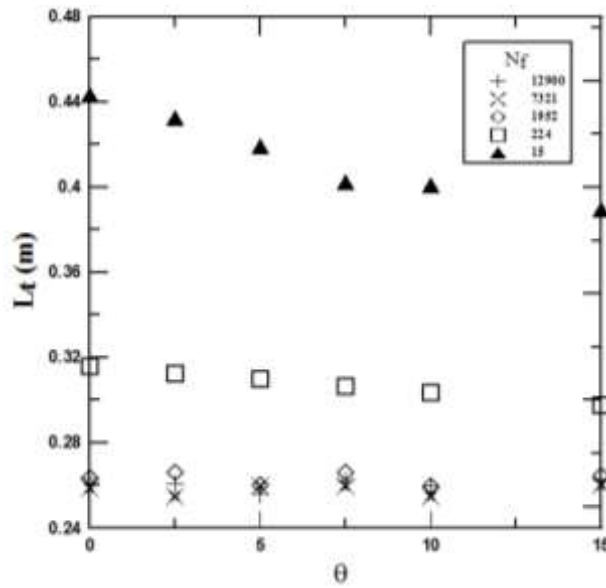


Figura 8: Comprimentos das bolhas de Taylor, geradas a partir de um bolsão de ar $L_0=20$ cm, em função do ângulo de inclinação, para as diferentes misturas.

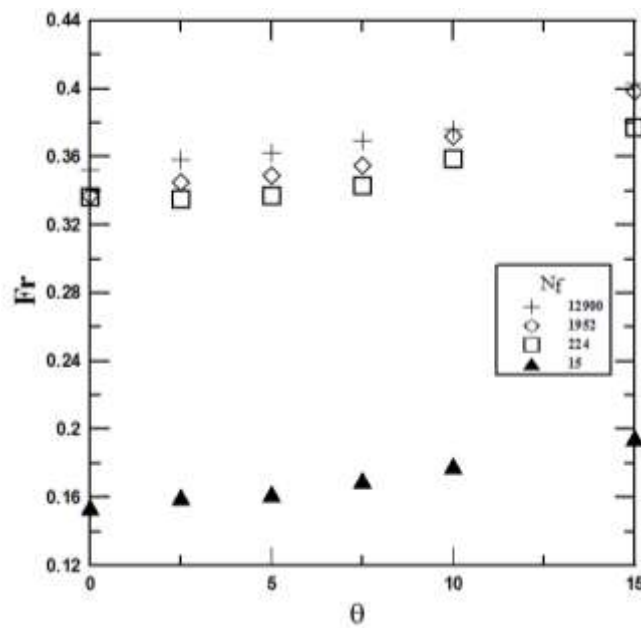


Figura 9: Relação entre o número de Froude e o ângulo de inclinação para bolhas geradas a partir de $L_0 = 10$ cm nas diferentes misturas.

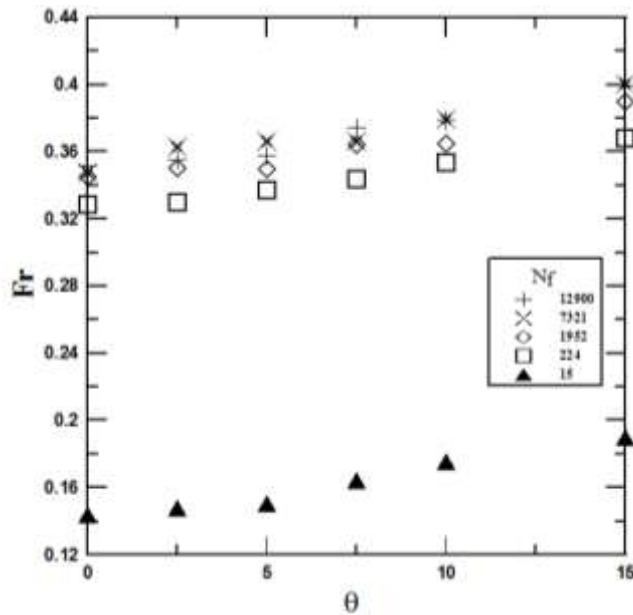


Figura 10: Relação entre o número de Froude e o ângulo de inclinação para bolhas geradas a partir de bolsões de ar $L_0 = 20$ cm nas diferentes misturas.

Pode-se observar, também, nas Figs. 9 e 10, que as velocidades das bolhas geradas pelos diferentes bolsões de ar L_0 , para cada condição experimental (N_f e θ) apresentaram valores semelhantes, o que está em concordância com Zukoski [4], que verificou a independência da velocidade com o ângulo de inclinação, para bolhas alongadas ascendendo em líquido estagnado.

5. CONCLUSÕES

O estudo experimental do movimento de bolhas alongadas em tubos vertical e ligeiramente inclinados revelou, inicialmente, que o aplicativo desenvolvido em Matlab, no LTE/IEN, apresentou resultados semelhantes àqueles obtidos com o programa comercial da Olympus. Assim sendo, essa ferramenta poderá ser usada para o processamento em futuros trabalhos, visto que a sua utilização é mais simples e menos trabalhosa, o que acaba por reduzir o tempo de processamento.

Em relação ao comprimento das bolhas, verificou-se um aumento deste com o aumento da viscosidade do líquido, ou com a diminuição do N_f , o que está em concordância com a literatura. As velocidades de ascensão tiveram o comportamento inverso ao do comprimento, visto que diminuíram com o aumento da viscosidade ou com a redução do N_f , para todas as inclinações. Já em relação à inclinação, as velocidades aumentaram com o aumento de θ , para todos os líquidos, o que, também, está em concordância com a literatura. Também em concordância com a literatura, foi observado que as velocidades de bolhas ascendendo nos mesmos líquidos e nas mesmas condições de inclinação, se mostraram independentes dos seus comprimentos.

Os estudos referentes à ascensão de bolhas de Taylor em colunas de líquido estagnado continuarão a ser desenvolvidos e o aplicativo em Matlab seguirá em desenvolvimento,

buscando o processamento de outros parâmetros, além da velocidade e do comprimento da bolha.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, FINEP e FAPERJ pelo suporte financeiro. Nathália N. Araújo agradece à CNEN pela bolsa de Iniciação Científica e Pedro A. M. Vinhas agradece ao CNPq pela bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

1. Dumitrescu, D. T., “Influence of viscosity, surface tension and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes”, *Z. angew. Math. Mechanics.*, **23**, pp 139–149 (1943).
2. Davies, R. M. e Taylor, G. ‘The mechanics of larges bubbles rising thrugh extend liquids and through liquids in tubes’, *Proceedings of the Royal Society of London*, **200A**, pp 375–390 (1950).
3. Nicklin, D., Wilkes, J. and Davidson, J., “Two-Phase Flow in Vertical Tubes”, *Trans. Instn. Chem. Engr*, **40**, pp. 61–68 (1962).
4. Zukoski, E.E., “Influence of viscosity, surface tension, and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes”, *Journal of Fluid Mechanics*, **25**, n 4, pp. 821–837 (1966).
5. Bendiksen, K.H., “An Experimental Investigation of the Motion of Long Bubbles in Inclined Tubes”, *International Journal of Multiphase Flow*, **10**, pp. 467–483 (1984)
6. Weber, M., Alarie, A. and Ryan, M.E., “Velocities of Extended Bubbles in Inclined Tubes”, *Chemical Engineering Science*, **41**, n. 9, pp. 2235–2240 (1986).
7. Cheng, N.S., “Formula for the viscosity of a glycerol-water mixture”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **47**, n 9, pp. 3285–3288 (2008).
8. Nogueira, S., Riethmuller, M. L., Campos, J.B.L.M and et al, “Flow in the nose region and annular film aroud a Taylor bubble rising through vertical columns of stagnant and flowing newtonian liquids”. *Chemical Engineering Science*, **61**, pp. 845-857. (2006).
9. Llewelin, E. W., Del Bello, E., Taddeucci, J., Scarlato, P. and Lane, S. J., “The Thickness of the Falling Film of Liquid around a Taylor Bubble”, *Proceedings of The Royal Society A*, **468**, pp. 1041-1064, (2012).
10. De Azevedo, M. B., Vinhas, P.A.M., Faccini, J.L.H., and Su, J., “Experimental Study of the Structure and Movement of Single Taylor Bubbles in Closed Vertical and Slightly Inclined Tubes”, *IV Journeys in Multiphase Flows*, Campinas, Brazil (2015).