

# ESTUDO EXPERIMENTAL DE BOLHAS DE TAYLOR INDIVIDUAIS ASCENDENDO EM COLUNA VERTICAL DE LÍQUIDO ESTAGNADO ATRAVÉS DA TÉCNICA ULTRASSÔNICA DE PULSO-ECO

Douglas dos Santos<sup>1</sup>, Marcos B. de Azevedo<sup>2,3</sup>, José L. H. Faccini<sup>2</sup> e Jian Su<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Nuclear – Escola Politécnica  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
21941-909 Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
douglas.santos@poli.ufrj.br

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

<sup>3</sup>Programa de Engenharia Nuclear, COPPE  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
21941-909 Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
sujian@lasmecoppe.ufrj.br

## RESUMO

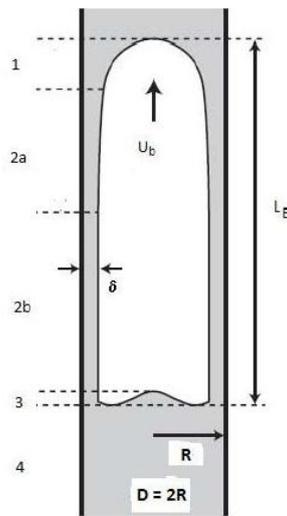
Este trabalho apresenta um estudo experimental do movimento ascendente de bolhas de Taylor individuais em uma coluna vertical de líquido estagnado, utilizando-se a técnica ultrassônica de pulso-eco. A coluna consistiu em um tubo de acrílico com 24 mm de diâmetro interno e 2 m de comprimento, parcialmente cheio com líquido, deixando-se um bolsão de ar com comprimento  $L_0$ . As bolhas foram obtidas através da inversão do tubo. Os líquidos utilizados foram misturas de água destilada e glicerina (água pura, 80% de água, 50% de água, 20% de água e glicerina pura), de modo a permitir uma avaliação da influência das propriedades do líquido, em especial a viscosidade, sobre os comprimentos e as velocidades de ascensão das bolhas de Taylor, além da espessura do filme líquido em torno das mesmas. Estes parâmetros foram obtidos através do processamento dos sinais ultrassônicos, realizado por programas desenvolvidos por meio do software Matlab. Todo o trabalho foi realizado no Laboratório de Termo-Hidráulica Experimental do Instituto de Engenharia Nuclear (LTE/IEN). Os resultados obtidos indicaram que as velocidades das bolhas diminuíram com o aumento da viscosidade, enquanto as espessuras dos filmes aumentaram. Além disso, os valores medidos para as velocidades e as espessuras dos filmes apresentaram boa concordância com correlações disponíveis na literatura para as suas estimativas.

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo do escoamento gás-líquido é bastante importante em diversas áreas da engenharia, como nuclear, petróleo, aeronáutica, naval e química. Na nuclear, em especial, o escoamento gás-líquido está relacionado, diretamente, com o processo de refrigeração do núcleo do reator.

Em reatores nucleares, pode ocorrer um fenômeno conhecido como *dryout*, que consiste na evaporação do líquido que entra em contato com as paredes dos tubos em altas temperaturas e assim interfere no processo de troca de calor, podendo comprometer a integridade estrutural dos componentes envolvidos [1].

O escoamento intermitente de bolhas alongadas (*slug flow*) é caracterizado por bolhas alongadas, também conhecidas como bolhas de Taylor, e um pistão de líquido entre bolhas sucessivas. A Fig. 1 apresenta um esquema com a descrição do formato dessas bolhas. Uma bolha de Taylor é caracterizada pelo seu formato de projétil, composta por (1) um nariz semiesférico, (2) um corpo cercado por um filme líquido em queda e que tende a um formato cilíndrico, (3) uma região da cauda e (4) uma esteira resultante da reentrada do líquido na região posterior da bolha, podendo causar pequenos vórtices. A região do corpo pode ser dividida em sub-regiões, (2a) a parte superior do corpo da bolha, onde o filme encontra-se em desenvolvimento e (2b) a parte inferior do corpo da bolha, onde o filme atinge o equilíbrio e, então, apresenta uma espessura constante  $\delta$  [2].



**Figura 1: Esquema de uma bolha de Taylor ascendendo em líquido estagnado.**

Trabalhos pioneiros de Dumitrescu [3] e Davies e Taylor [4] propuseram correlações para estimar a velocidade de ascensão de bolhas de Taylor em uma coluna vertical. Nicklin et al. [5], por meio de procedimentos experimentais mais elaborados, obtiveram boa concordância com os resultados daqueles autores e propuseram uma correlação, apresentada na Eq. 1, para a velocidade de ascensão dessas bolhas em tubos verticais contendo água estagnada e fechados nas extremidades.

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

onde,  $U_b$  é a velocidade da bolha,  $D$  é o diâmetro interno do tubo e  $g$  é a aceleração da gravidade.

Zukoski [6] verificou que a velocidade de uma bolha em tubos contendo líquido estagnado e vedado nas extremidades é independente do seu comprimento e depende apenas do empuxo e de forças de arrasto.

Llewellyn et al. [7] estudaram o movimento ascendente de bolhas de Taylor em colunas verticais, determinando a espessura de equilíbrio do filme líquido através de uma metodologia que relacionava o comprimento da bolha  $L_b$  e o bolsão de ar  $L_0$  que a gerou.

Esses autores definiram a espessura adimensional de equilíbrio do filme líquido como  $\delta' = \delta / R$ , sendo  $\delta$  a espessura de equilíbrio do filme e  $R$  o raio interno do tubo e verificaram que  $\delta'$  poderia ser escrito como função apenas do número adimensional inverso da viscosidade  $N_f$ , definido como:

$$N_f = (\rho_L / \mu_L) \sqrt{gD^3}, \quad (2)$$

onde  $\rho_L$  é a densidade do líquido,  $\mu_L$  é a sua viscosidade dinâmica,  $D$  é o diâmetro interno do tubo e  $g$  é a da aceleração da gravidade.

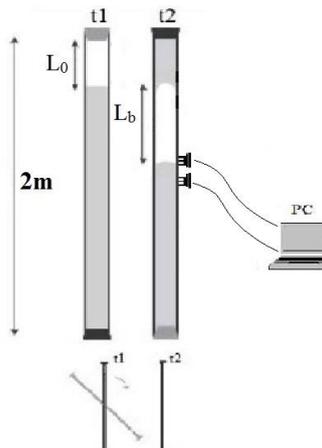
Com base nos resultados experimentais por eles obtidos, juntamente com aqueles obtidos por Nogueira et al.[8], Llewellyn et al.[7] propuseram uma correlação empírica para a estimativa de  $\delta'$ , definida por:

$$\delta' = 0,204 + 0,123 \tanh(2,66 - 1,15 \log_{10} N_f) \quad (3)$$

Esse trabalho apresenta um estudo do movimento ascendente de bolhas de Taylor em coluna vertical de líquido estagnado, contendo misturas de água destilada e glicerina (água pura, 80% de água, 50% de água, 20% de água e glicerina pura), usando a técnica ultrassônica de pulso-eco, de modo a permitir uma avaliação da influência das propriedades do líquido, em especial da viscosidade, sobre os comprimentos e as velocidades de ascensão das bolhas de Taylor, bem como sobre a espessura do filme líquido em torno das mesmas.

## 2. MONTAGEM E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais apresentados neste trabalho foram obtidos em uma coluna de líquido estagnado, que consiste em tubo de acrílico de seção circular com diâmetro interno de 0,024m e com 2,0m de comprimento, localizada no Laboratório de Termo-Hidráulica Experimental do Instituto de Engenharia Nuclear (LTE/IEN/CNEN). A Fig. 2 apresenta um esquema dessa coluna.



**Figura 2: Esquema da coluna vertical de líquido estagnado.**

O tubo apresenta-se parcialmente cheio, deixando-se apenas um bolsão de ar de comprimento  $L_0$ . Dois transdutores piezoelétricos da marca Olympus (Modelo V112), de 10MHz e 6,35mm de diâmetro, separados por uma distância de aproximadamente 10cm entre eles, foram adequadamente posicionados a 50 e 60cm do topo do tubo, exceto para o caso da glicerina onde essas distâncias foram de 70 e 80cm do topo, respectivamente, devido ao maior comprimento das bolhas geradas nesses fluidos.

A Tab. 1 apresenta as condições utilizadas nos experimentos realizados incluindo as densidades do líquido ( $\rho_L$ ), suas viscosidades dinâmicas ( $\mu_L$ ) e os valores de  $N_f$  calculados usando-se a Eq.2.

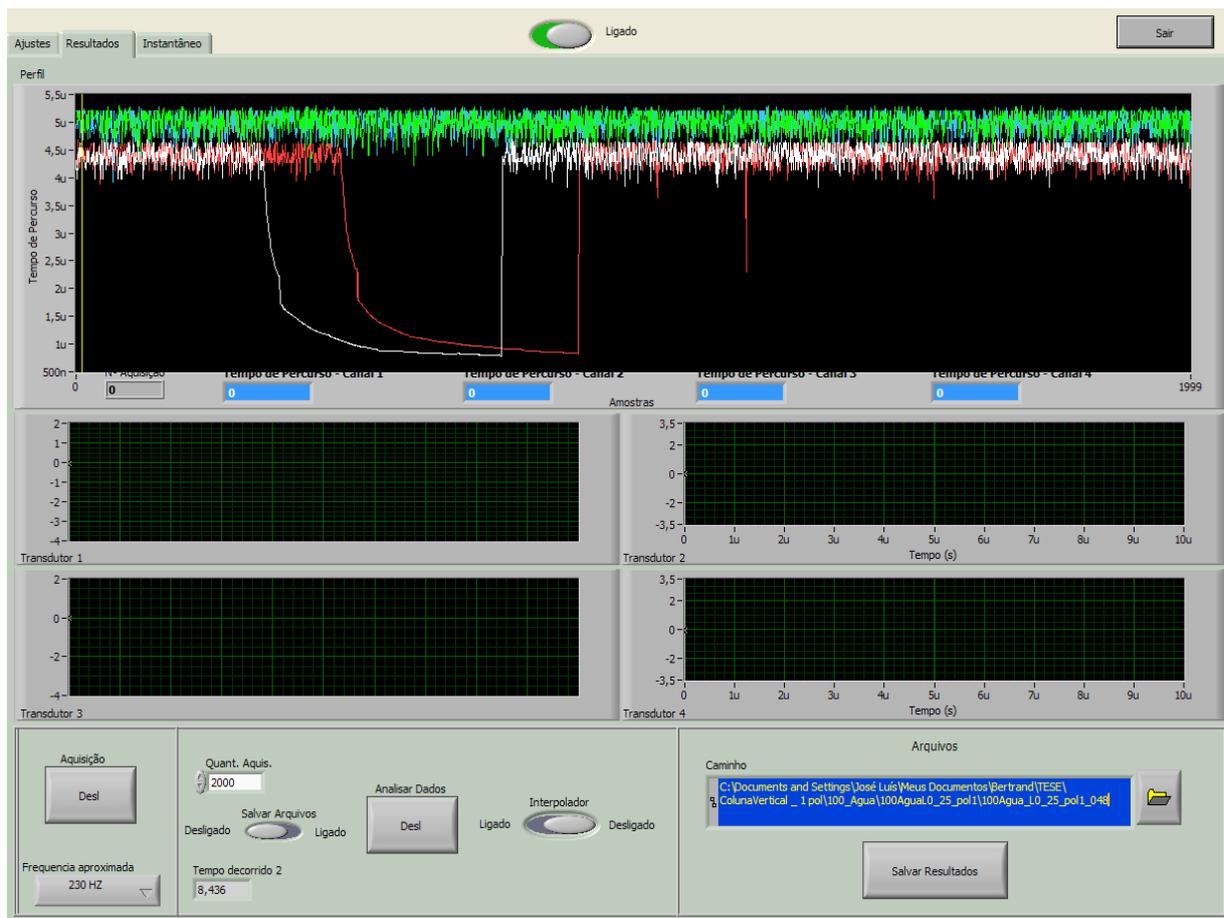
**Tabela 1: Condições Experimentais**

Líquido	$\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu_L$ (N.s/m <sup>2</sup> )	$N_f$
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
D = 0,024m, para todos os experimentos; g = 9,81m/s <sup>2</sup>			

Os valores apresentados na Tab. 1 foram determinados a partir de correlações propostas por Cheng [9], que estimam tais propriedades para misturas de água e glicerina, na faixa de fração volumétrica entre 0-100% e para temperaturas entre 0-100°C.

A aquisição dos dados foi realizada por meio de um sistema ultrassônico composto, além dos transdutores, por uma placa geradora/multiplexadora e um computador (PC) com um programa em LabView, desenvolvido no IEN, para controlar até quatro transdutores em modo transmissão ou pulso-eco. Na técnica de pulso-eco, um único transdutor é usado como emissor e receptor das ondas ultrassônicas. Tal técnica é baseada na grande diferença de impedâncias acústicas entre as fases líquida e gasosa, que permite que a onda seja refletida, quase que totalmente, pela interface gás-líquido. Assim a localização dessa interface pode ser determinada através da medição do tempo de trânsito entre a emissão da onda e o seu retorno depois da reflexão [10]. Os tempos de trânsito ao longo de um determinado intervalo (tempo de aquisição) são registrados em arquivos tipo TXT, para posterior processamento.

A Fig. 3 apresenta uma tela de aquisição do software de controle, onde é possível observar-se os sinais referentes à detecção da passagem de uma bolha alongada pelos dois transdutores. O software apresenta como parâmetros a frequência aproximada e o número de pontos de aquisição. A relação entre esses dois parâmetros define o tempo de aquisição do experimento, sendo os seus ajustes limitados pela memória do sistema. Dependendo das condições experimentais utilizadas, o ajuste desses parâmetros pode variar. Um bom exemplo disso são os experimentos utilizando glicerina pura, onde se faz necessário aumentar o número de pontos e diminuir a frequência em relação àqueles parâmetros utilizados no caso da água, em função de se requerer um maior tempo de aquisição, já que a passagem da bolha pelos transdutores torna-se mais lenta. Como dados de saída o software fornece, além do tempo de aquisição, os sinais referentes ao tempo de trânsito para cada um dos pontos de aquisição, nos dois transdutores utilizados, correspondentes aos sinais em branco e vermelho observados na Fig.3.



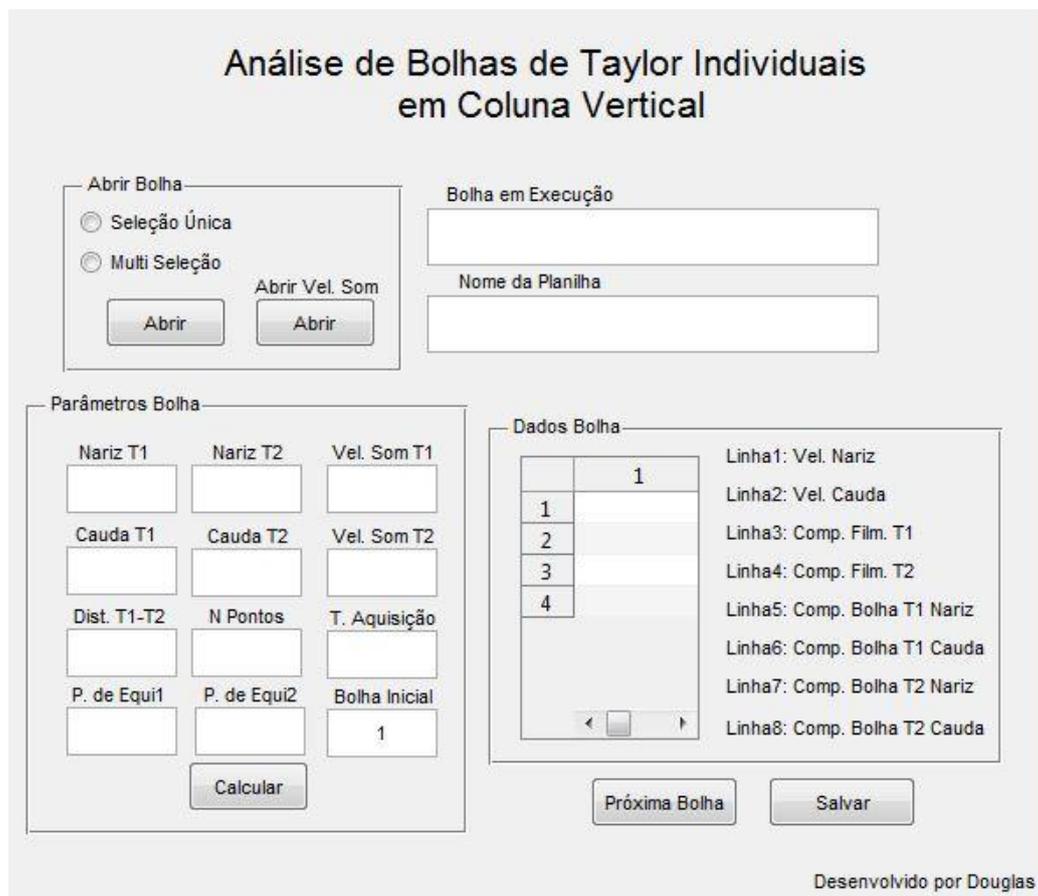
**Figura 3: Tela de aquisição do software de controle do sistema ultrassônico.**

Para o processamento dos dados obtidos vem sendo desenvolvido, no LTE/IEN, um programa no Matlab que realiza os cálculos para a determinação da velocidade de ascensão ( $U_b$ ) e comprimento da bolha ( $L_b$ ), bem como da espessura de equilíbrio do filme líquido em seu entorno ( $\delta$ ). Esse programa está em fase de desenvolvimento, não sendo possível, ainda, realizar-se todo o processamento dos dados de forma automática.

No estágio atual, os cálculos requerem que sejam fornecidos ao programa alguns parâmetros de entrada, tais como número de pontos de aquisição (N. Pontos), tempo de aquisição (T. Aquisição), distância entre os transdutores (Dist T1-T2), posição do nariz da bolha em cada transdutor (Nariz T1 e Nariz T2), posição da cauda da bolha em cada transdutor (Cauda T1 e Cauda T2) e o ponto sobre a interface gás-líquido onde se inicia a região de equilíbrio do filme, em cada transdutor (P. de Equi1 e P. de Equi2). O programa utiliza o arquivo do tipo TXT, apresentando-o na forma de um gráfico semelhante àquele apresentado na Fig. 3, o que possibilita a identificação manual dos parâmetros de entrada necessários. A partir de outro arquivo do tipo TXT, o programa determina também a velocidade do som medida em cada um dos dois transdutores (Vel. Som T1 e Vel. Som T2).

A Fig. 4 apresenta uma tela do programa de processamento desenvolvido no Matlab, onde pode ser observada a região superior que possui dois botões, um “Abrir” onde é possível escolher entre abrir o arquivo de uma única bolha e analisa-la individualmente ou abrir os

arquivos referentes a várias bolhas de uma só vez. O botão “Abrir Vel. Som” é usado para analisar o arquivo com os dados da velocidade do som, definindo-se um dos parâmetros de entrada do programa. Ao lado, notam-se duas caixas de texto onde é possível observar qual arquivo (bolha), no momento, está sendo processado e também definir o nome da planilha com os resultados finais do processamento. Já na parte inferior, encontram-se as caixas de texto onde é possível definir-se os parâmetros de entrada descritos anteriormente. Ao lado dos parâmetros de entrada são encontrados os resultados correspondentes à análise de cada arquivo, sendo, então, fornecidas as velocidades do nariz e da cauda das bolhas, bem como seus comprimentos e as espessuras de equilíbrio dos filmes, para cada transdutor. No caso dos comprimentos das bolhas, estes são calculados usando-se, como referência, tanto a velocidade do seu nariz como a da sua cauda.



**Figura 4: Tela de interface com o usuário do programa de processamento desenvolvido no Matlab.**

A velocidade do som, para cada líquido utilizado, foi medida experimentalmente utilizando a técnica ultrassônica, sendo determinada através da seguinte expressão:

$$V_{som} = 2D/T_t \quad (4)$$

onde,  $V_{som}$  é a velocidade do som medida,  $D$  é o diâmetro do tubo e  $T_t$  é o tempo de trânsito medido entre a emissão e a recepção da onda ultrassônica depois de ser refletida pela parede

interna do tubo cheio com o líquido e em posição diametralmente oposta àquela do transdutor.

A velocidade da bolha  $U_b$  é determinada por meio da seguinte relação:

$$U_b = \Delta Z / \Delta t, \quad (5)$$

onde,  $\Delta Z$  é a distância entre os transdutores e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo entre os momentos em que cada transdutor detecta um mesmo ponto de referência da bolha.

Para a determinação do comprimento da bolha  $L_b$ , é usada a seguinte expressão:

$$L_b = U_b (t_c - t_n), \quad (6)$$

onde,  $U_b$  é a velocidade de ascensão da bolha, calculada através da Eq. 5 e  $(t_c - t_n)$  é o intervalo de tempo entre os momentos nos quais o nariz e a cauda da bolha são identificados por um mesmo transdutor.

Já a espessura de equilíbrio do filme líquido em torno das bolhas de Taylor  $\delta$  é calculada através da relação a seguir:

$$\delta = (\sum V_{som} T_i / 2) / n, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

Na Eq. 7,  $V_{som}$  é a velocidade do som no líquido, medida através da Eq. 4,  $T_i$  é o tempo de trânsito na região de equilíbrio do filme e  $n$  corresponde aos pontos de aquisição correspondente à aquisição dos sinais na região de equilíbrio, sendo atribuído o valor 1 ao ponto onde esse equilíbrio inicia.

Após o processamento, os resultados para cada bolha são apresentados na forma de uma planilha em arquivo tipo XLS. Em tais planilhas são, também, fornecidas as médias e os desvios-padrão para cada parâmetro calculado, levando-se em conta todas as bolhas analisadas.

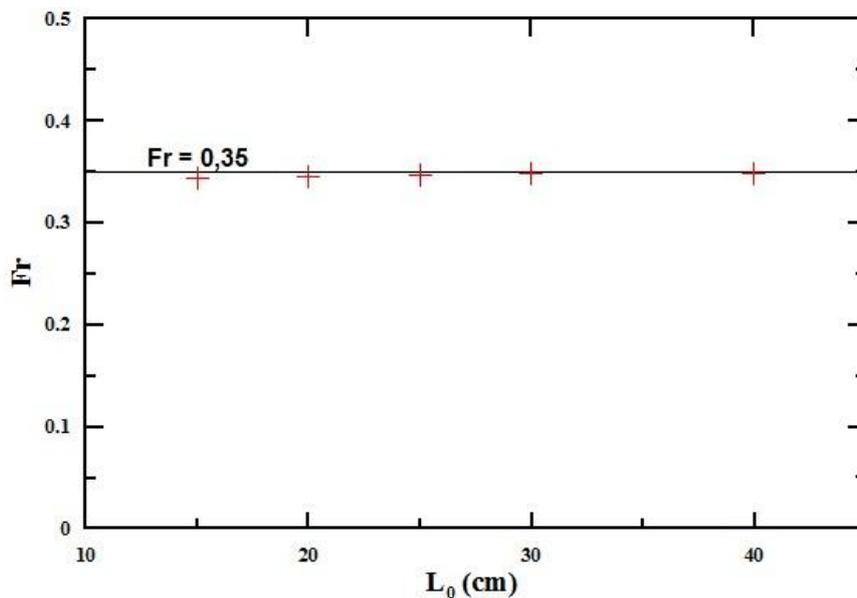
### 3. RESULTADOS

Todos os resultados foram obtidos a partir das condições experimentais citadas previamente na Tab. 1 e apresentados na forma de parâmetros adimensionais. Dessa forma, é importante definir-se o número de Froude ( $Fr$ ), de acordo com a seguinte relação:

$$Fr = U_b / \sqrt{gD}, \quad (8)$$

onde,  $U_b$  é a velocidade da bolha,  $D$  é o diâmetro interno do tubo e  $g$  é a aceleração da gravidade.

Inicialmente são apresentados os valores do número de  $Fr$ , definido na Eq. 8, obtidos para bolhas geradas a partir de diferentes bolsões de ar  $L_0$ , e, portanto, com diferentes comprimentos  $L_b$ , ascendendo em água, conforme a Fig. 5.

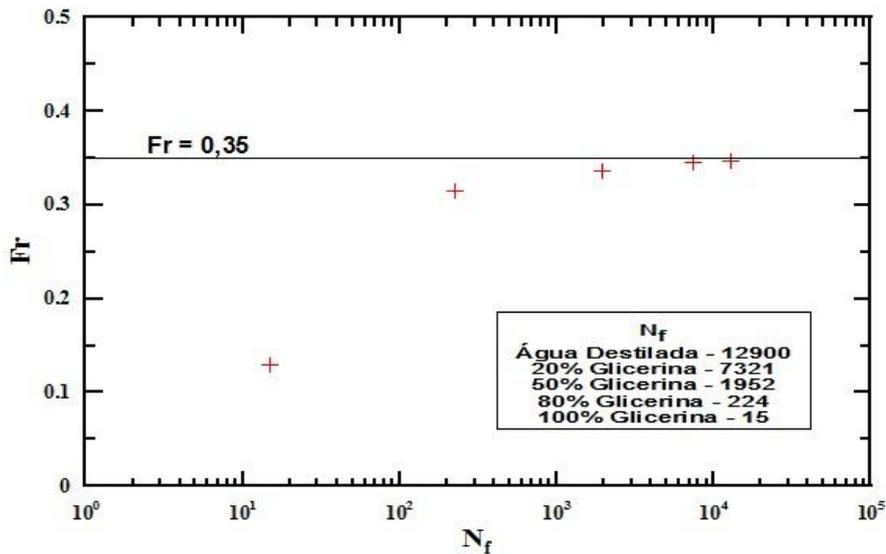


**Figura 5: Relação entre o número de Froude e o comprimento de bolhas geradas a partir de diferentes bolsões de ar  $L_0$ , ascendendo verticalmente em água destilada.**

A Fig. 5 revela que os valores de  $Fr$  não variam com o comprimento da bolha, o que está em concordância com observações realizadas por Zukoski[6]. Tal independência da velocidade com o comprimento da bolha foi observado para todos os fluidos estudados. Além disso, é possível observar que, para a água, os resultados se apresentaram em concordância com a correlação proposta por Nicklin et al.[5] para estimar a velocidade de ascensão das bolhas de Taylor em líquido estagnado (Eq. 1), onde o valor esperado seria  $Fr = 0,35$ .

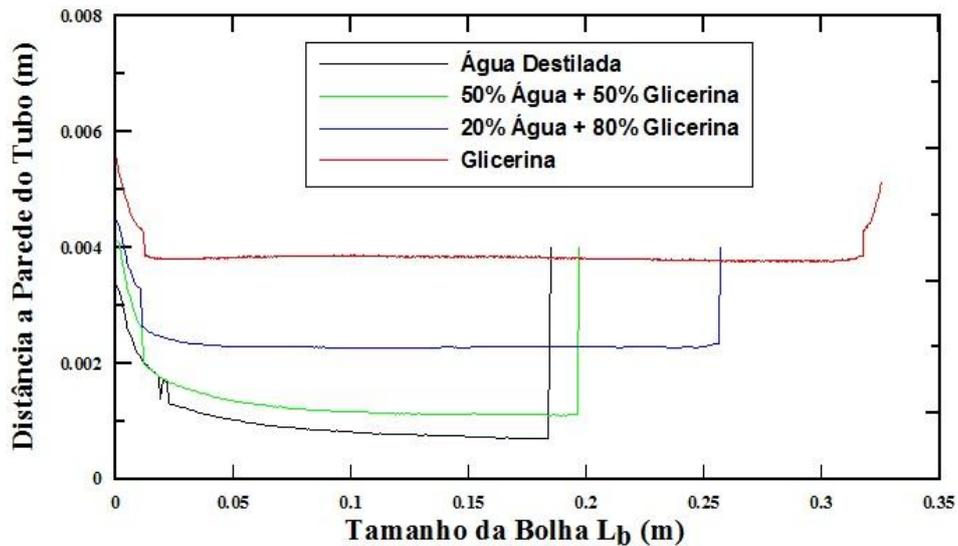
Na Fig. 6, é apresentada a variação de  $Fr$  com o número inverso da viscosidade ( $N_f$ ), onde pode-se notar que  $Fr$  tende a diminuir quando  $N_f$  diminui, ou seja, para líquidos mais viscosos a velocidade de ascensão da bolha  $U_b$  é menor, se comparada com aquelas para líquidos menos viscosos. Nessa figura é possível observar uma grande diferença entre os valores de  $Fr$  correspondentes aos fluidos mais e menos viscosos estudados, ou seja, a glicerina e a água destilada, respectivamente.

Mais uma vez, os valores experimentais medidos apresentaram boa concordância com a correlação proposta por Nicklin et al.[5] e apresentada na Eq. 1, para os casos de líquidos pouco viscosos, como a água pura. Na Fig. 6 é possível observar-se um afastamento de  $Fr$  em relação ao valor esperado, representado pela reta horizontal em  $Fr = 0,35$ .



**Figura 6: Relação entre o número de Froude e o número inverso da viscosidade  $N_f$ .**

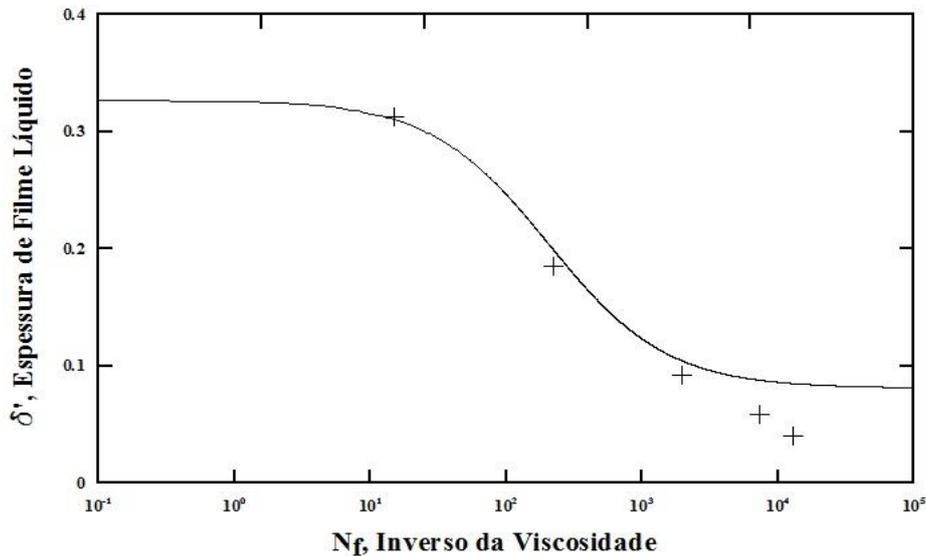
A Fig. 7 apresenta os perfis na região do filme de bolhas geradas a partir de um mesmo bolsão de ar  $L_0$ , ascendendo em líquidos com diferentes viscosidades. É possível observar, nessa figura, que, à medida que a viscosidade aumenta o comprimento da bolha e a espessura do filme também aumentam.



**Figura 7: Superposição de bolhas geradas a partir de um mesmo bolsão de ar  $L_0 = 15\text{cm}$  ascendendo em líquidos com viscosidades diferentes.**

As medições experimentais revelaram que a espessura de equilíbrio dos filmes aumenta com o aumento da viscosidade do líquido. É natural, então, que os comprimentos das bolhas aumentem para compensar o aumento de espessura, visto que as bolhas, apresentadas na Fig. 7, foram geradas a partir de um mesmo bolsão de ar, possuindo, portanto, um mesmo volume [11].

Na Fig. 8, são apresentados os valores da espessura de equilíbrio adimensional  $\delta'$  medida pela técnica ultrassônica para os diferentes líquidos, bem como a correlação de Llewellyn et al. [7], definida pela Eq. 3. É possível notar uma boa concordância entre os valores experimentais e aqueles estimados pela correlação, para o caso de líquidos de altas viscosidades ou mais baixos  $N_f$ . Entretanto para os líquidos de baixa viscosidade (altos  $N_f$ ), observou-se um desvio em relação à correlação proposta por Llewellyn et al. [7].



**Figura 8: Medidas experimentais para as espessuras de equilíbrio adimensionais  $\delta'$  dos filmes, em função do número inverso da viscosidade  $N_f$ . +, Medições Experimentais; linha sólida, Correlação de Llewellyn et al.[7].**

De uma maneira geral, os resultados apresentados no presente trabalho mostraram-se em concordância com a literatura científica, revelando, assim, que os procedimentos experimentais, tanto para aquisição dos dados, através da técnica ultrassônica, bem como para o seu processamento, através do programa desenvolvido no Matlab, encontram-se bem ajustados.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos durante os experimentos mostraram que, para o caso de líquidos pouco viscosos, em especial a água, o valor medido para velocidade de ascensão  $U_b$  apresentou concordância com o valor estimado através da correlação proposta por Nicklin et al.[5]. Além disso, foi verificado que  $U_b$  se mostrou independente do comprimento da bolha  $L_b$ , em concordância com observações prévias de Zukoski[6].

Por outro lado, considerando-se todos os fluidos estudados, foi observado que  $U_b$  diminuiu ao passo que a viscosidade do fluido aumentou.

Já as espessuras de equilíbrio do filme líquido  $\delta$  e o comprimento das bolhas  $L_b$  geradas a partir de um mesmo bolsão de ar  $L_0$  tiveram um comportamento inverso ao da velocidade, ou seja, aumentaram ao passo que a viscosidade aumentou.

Os resultados revelaram que os procedimentos experimentais, tanto para aquisição dos dados como para o seu processamento, encontram-se bem ajustados, em função das boas concordâncias verificadas entre eles e a literatura.

Embora o programa de processamento tenha apresentado resultados satisfatórios, este continuará em desenvolvimento, sendo um de seus maiores desafios a possibilidade de identificar de forma automatizada todos os parâmetros de entrada necessários para o cálculo dos parâmetros interfaciais das bolhas de Taylor.

O estudo do movimento de bolhas de Taylor segue em desenvolvimento no LTE/IEN, buscando, sempre, a melhoria das técnicas de aquisição e do processamento dos dados obtidos.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, FINEP e FAPERJ pelo suporte financeiro. Douglas dos Santos agradece à CNEN pela bolsa de Iniciação Científica.

### REFERÊNCIAS

1. Ghajar, A. J., “Non-boiling heat transfer in gas-liquid flow in pipes - a tutorial”, *Journal of Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, **XXVII**, pp.46-73 (2005).
2. De Azevedo, M. B., Faccini, J. L. H. and Su, J., “Ultrasonic Measurements of Bubbles Shapes and Liquid Film Thickness of a Taylor Bubble Rising in a Stagnant Water Column”, *Proceeding of International Nuclear Atlantic Conference, Recife, PE, Brazil (2013)*.
3. Dumitrescu, D. T., “Stromung an Einer Luftblase in Senkrechten Rohr”, *Zeitschrift fuer Angewandte Mathematik und Mechanik*, **23**, pp. 217-223, (1943).
4. Davies, R. M. and Taylor, G. L., “The Mechanism of Large Bubbles Rising Through Extend Liquids and Through Liquids in Tubes”, *Proceedings of The Royal Society of London Series A*, **200**, pp. 375-390, (1950).
5. Nicklin, D. J., Wilkes, J. O. and Davidson, J. F., “Two-Phase Flow in Vertical Tubes”, *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, **40**, pp. 61-68, (1962).
6. 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).
7. Llewellyn, 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).
8. Nogueira, S., Riethmuller, M. L., Campos, J.B.L.M and et al, “Flow in the nose region and annular film around a Taylor bubble rising through vertical columns of stagnant and flowing newtonian liquids”. *Chemical Engineering Science*, **61**, pp. 845-857. (2006).
9. Cheng, N. S., “Formula for the viscosity of a glycerol-water mixture”. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **47**, n. 9, pp. 3285–3288, (2008).
10. Chang, J. S. and Morala, E. C., “Determination of two-phase interfacial areas by a ultrasonic technique”. *Nuclear Engineering and Design*, **122**, pp. 143-156. (1990).
11. De Azevedo, M. B., Faccini, J. L. H. and Su, J., “Experimental Study of the Movement of Single Large Bubbles in Closed Vertical Tube”, *Proceeding of the 15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Belém, PA, Brazil (2014)*.