



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ESTUDO EXPERIMENTAL DOS PERFIS DE BOLHAS DE TAYLOR INDIVIDUAIS ASCENDENDO EM COLUNAS VERTICAIS E INCLINADAS DE LÍQUIDO ESTAGNADO ATRAVÉS DE UMA TÉCNICA ULTRASSÔNICA DE PULSO-ECO

Marcos Bertrand de Azevedo, bertrand@ien.gov.br¹

Jose Luiz Horacio Faccini, faccini@ien.gov.br¹

Jian Su, sujian@nuclear.ufrj.br²

¹Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN), Rua Hélio de Almeida, 75 - Cidade Universitária - Ilha do Fundão - CEP 21941-906 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

²Programa de Engenharia Nuclear, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Cidade Universitária - Ilha do Fundão - CEP 21945-970 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo experimental da ascensão de bolhas de Taylor individuais em tubos cilíndricos verticais e ligeiramente inclinados contendo misturas de água e glicerina estagnadas, usando-se uma técnica ultrassônica de pulso-eco. Tubos de acrílico com 2,0 m de comprimento e diâmetros internos de 0,019; 0,024 e 0,034 m foram parcialmente encheidos com os líquidos, deixando-se um bolsão de ar de comprimento L_0 , em seu topo. As bolhas foram geradas através da inversão desses tubos. Os ângulos de inclinação θ estudados foram 0° ; $2,5^\circ$; 5° ; $7,5^\circ$; 10° e 15° , a partir da posição vertical. As velocidades de ascensão das bolhas U_θ e os seus perfis inferior, superior e laterais foram medidos. Identificou-se diferenças entre os perfis, usualmente descritos na literatura, mais característicos de bolhas bidimensionais, e aqueles observados em tubos cilíndricos. Foram identificadas, também, diferenças no comportamento de bolhas ascendendo em líquidos mais viscosos e menos viscosos. Quando o tubo é inclinado e a bolha é comprimida contra a parede superior do tubo, há uma tendência da bolha deformar-se, expandindo-se para as suas laterais. Para bolhas ascendendo em líquidos menos viscosos, essa expansão lateral das bolhas encontrou uma resistência, que tendeu a aumentar com o aumento de θ . Já no caso de líquidos mais viscosos, as bolhas encontraram maior liberdade para deformar-se lateralmente. Os resultados obtidos permitem uma melhor compreensão do comportamento das bolhas, no interior de tubos cilíndricos inclinados, e a sua influência sobre parâmetros interfaciais, tais como as velocidades das bolhas U_θ .

Palavras-chave: Termo-Hidráulica de Reatores Nucleares, Bolhas de Taylor, Líquido Estagnado, Tubos Cilíndricos Inclinados, Técnica Ultrassônica de Pulso-Eco.

1. INTRODUÇÃO

Escoamentos multifásicos podem ser encontrados em diversos processos naturais, industriais e do nosso cotidiano. No caso da indústria nuclear, reatores de potência encontram aplicação na geração nucleoeletrônica, especialmente, por meio de reatores à água pressurizada (PWR) e reatores à água fervente (BWR), em plantas de dessalinização, na propulsão naval, entre outras.

Na propulsão naval, a liberdade de movimento encontrada em uma embarcação, especialmente em submarinos, faz com que haja uma grande possibilidade de ocorrência de escoamentos bifásicos inclinados no núcleo do reator. Desta forma, é evidente a importância de se estender os estudos da estrutura dos escoamentos bifásicos, para além dos casos vertical e horizontal, com o objetivo de se compreender e prever o comportamento de escoamentos inclinados, pensando nos aspectos de transferência de calor e, consequentemente, na segurança de reatores.

Um padrão de escoamento passível de ser encontrado em reatores nucleares, é o escoamento intermitente de bolhas alongadas (*slug flow*), que é caracterizado pela alternância quase periódica entre bolhas alongadas com forma de projétil, conhecidas como bolhas de Taylor, e pistões de líquido. No caso de bolhas ascendentes, o líquido em torno da bolha se move na forma de filmes finos em queda, junto à parede do tubo.

A análise dos efeitos da inclinação sobre os diferentes parâmetros interfaciais do escoamento intermitente de bolhas

alongadas tende a ganhar complexidade, em relação ao caso de escoamento vertical, devido a alterações na geometria das bolhas de Taylor, em resposta à variação do ângulo de inclinação. Quando a bolha passa a escoar em tubos inclinados, verifica-se uma perda de simetria, em relação ao eixo do tubo, conforme apresentado na Fig. 1.

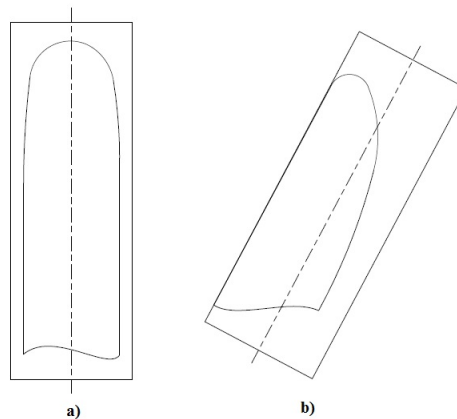


Figura 1: Diferença entre a geometria das bolhas de Taylor para: a) Escoamento vertical; b) Escoamento inclinado.

A literatura que trata da ascensão de bolhas de Taylor em tubos inclinados, parece ter concentrado os seus esforços no sentido de estimar as velocidades das bolhas em cada inclinação entre a posição vertical e a horizontal (0° e 90°) e na influência dos diâmetros do tubo e das propriedades dos líquidos nos quais as bolhas ascendem. De uma maneira geral, os efeitos do ângulo de inclinação sobre a velocidade são atribuídos às variações do volume de líquido capaz de passar na parte inferior da bolha, quando a componente radial da força de empuxo pressiona a bolha contra a parede superior do tubo, com força cada vez maior, à medida que o tubo é inclinado, a partir da posição vertical (0°). Pouco, ou nada, costuma ser comentado em relação ao que ocorre nas outras posições em torno da bolha, como por exemplo, nos filmes que escoam entre ela e as paredes superior e laterais do tubo.

Um dos primeiros trabalhos relevantes sobre o efeito do ângulo de inclinação sobre parâmetros interfaciais de bolhas de Taylor pode ser atribuído à Zukoski (1966), que verificou um aumento da velocidade da bolha U_θ , à medida que o ângulo de inclinação aumentava a partir da posição vertical (0°), até um valor máximo próximo de 45° , e que a continuação no aumento do ângulo causou uma redução de U_θ , até atingir a posição horizontal (90°). Outros autores, tais como Bendiksen (1984), Weber *et al.* (1986), entre outros, também identificaram esse comportamento qualitativo para a influência de θ sobre U_θ .

Maneri e Zuber (1974) estudaram as características da ascensão de bolhas em tanques bidimensionais, que consistiam, basicamente, de duas placas, separadas por uma certa distância. Bolhas de ar individuais, com diferentes volumes, foram injetadas pelas partes inferiores desses tanques que podiam tomar a posição vertical ou inclinada. Para bolhas de maior volume, como as bolhas de Taylor, esses autores consideraram que as bolhas em ascensão de forma inclinada eram assimétricas, com o escoamento de líquido ao seu redor desequilibrando-se progressivamente e tendendo a ocorrer apenas por um dos lados da bolha (bolha bidimensional), à medida que a inclinação aumentava, em relação à vertical.

De Azevedo *et al.* (2015) e De Azevedo (2016) identificaram diferenças entre os perfis inferiores de bolhas (interfaces ar-líquido), ascendendo em tubos cilíndricos cheios com líquidos mais viscosos e com líquidos menos viscosos. As Figuras 2 e 3 apresentam os sinais ultrassônicos referentes a bolhas geradas a partir de um bolsão de ar $L_0 = 0,20$ m, ascendendo em tubo com $D = 0,024$ m e inclinações entre 0° e 15° , contendo glicerina ($M = 29,86$) e água destilada ($M = 1,82 \times 10^{-11}$), respectivamente, sendo M o número de Morton, definido como:

$$M = \frac{g\mu_L^4\Delta\rho}{\rho_L^2\sigma_L^3}, \quad (1)$$

onde: μ_L é a viscosidade dinâmica do líquido, $\Delta\rho$ é a diferença entre as densidades das fases líquida e gasosa, ρ_L é a densidade da fase líquida, σ_L é a tensão superficial e g é a aceleração da gravidade.

Nas Figuras 2a e 3a, pode-se observar as interfaces ar-líquido detectadas por transdutores posicionados na parte inferior do tubo, para bolhas ascendendo, respectivamente, em glicerina pura e em água, enquanto que nas Figs. 2b e 3b observa-se os sinais correspondentes à parte superior das bolhas. Nessas figuras verifica-se que, nos dois casos, à medida que a inclinação do tubo aumenta, a bolha é empurrada mais intensamente, em direção à parede superior, sendo o seu eixo deslocado em relação ao eixo do tubo. Entretanto, é possível observar uma diferença entre os formatos associados às interfaces ar-líquido nas regiões inferiores dos corpos das bolhas, ascendendo em líquidos com maiores ou menores M . Para líquidos mais viscosos (maiores M) os perfis mostraram-se mais uniformes, enquanto que para aqueles menos viscosos (menores M) observou-se uma evidente sinuosidade, que tende a intensificar-se, à medida que o ângulo de inclinação θ aumenta, entre 0° e 15° , a partir da posição vertical.

Os perfis observados nas Figs. 2 e 3 diferem-se claramente daqueles fotografados por Maneri (1970) e obtidos através de simulação numérica por Couet e Strumolo (1987) e apresentados na Fig. 4, para a ascensão de bolhas em tanques bidimensionais.

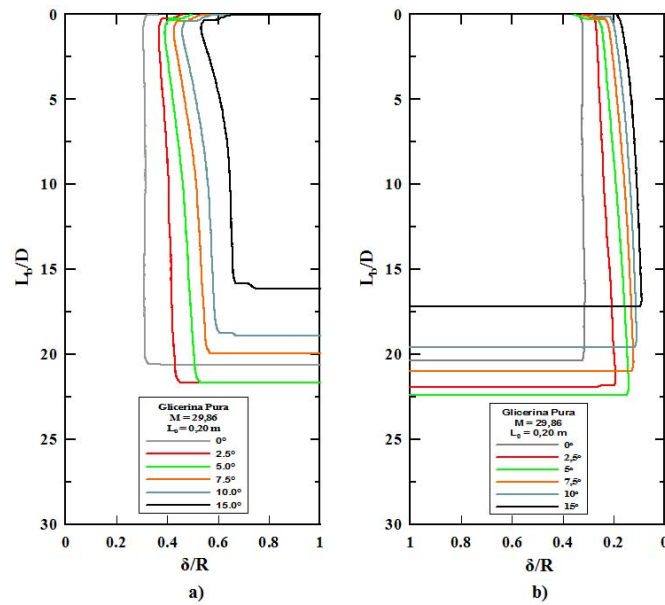


Figura 2: Perfis dos filmes para bolhas de Taylor, ascendendo em tubos inclinados com $D = 0,024$ m, contendo glicerina: a) na região inferior das bolhas; b) na região superior das bolhas (De Azevedo, 2016).

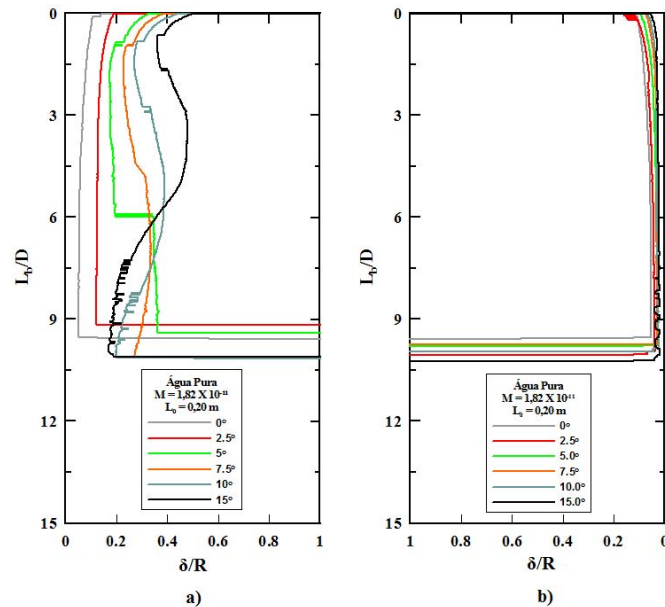


Figura 3: Perfis dos filmes para bolhas de Taylor, ascendendo em tubos inclinados com $D = 0,024$ m, contendo água destilada: a) na região inferior das bolhas; b) na região superior das bolhas (De Azevedo, 2016).

Faz-se importante enfatizar que o perfil de bolha apresentado na Fig. 4 corresponde a bolhas ascendendo entre duas placas paralelas, de grandes dimensões, separadas por uma distância equivalente aos diâmetros de tubos cilíndricos. Nesse caso, o movimento da bolha é limitado, apenas, por uma parede (placa) superior e outra inferior. Assim, ao variar-se a inclinação das placas, as bolhas teriam grande liberdade para deformar-se, expandindo-se lateralmente e permitindo que o líquido que escoar ao seu redor se reorganize sem grandes restrições. Por outro lado, no caso de bolhas ascendendo em tubos inclinados com a geometria da seção transversal bem definida, como a circular utilizada no presente trabalho, seria natural esperar um comportamento diferente. Qualquer alteração de formato da bolha ou expansão lateral da mesma, bem como qualquer reorganização do escoamento do líquido ao seu redor, estariam sujeitos a condições mais restritas, onde os volumes envolvidos seriam muito bem definidos. Isso poderia ajudar a explicar as diferenças observadas entre os formatos das bolhas estudadas no presente trabalho e aqueles estudados por Maneri (1970) e Couet e Strumolo (1987) e, mais comumente descritos na literatura.

Esse trabalho apresenta um estudo experimental da ascensão de bolhas de Taylor individuais em tubos cilíndricos verticais e ligeiramente inclinados, utilizando uma técnica ultrassônica de pulso-eco. O objetivo do estudo foi medir as velocidades das bolhas U_θ , ascendendo em tubos cheios com diferentes misturas de água destilada e glicerina estagnadas, levando-se em consideração os perfis inferior, superior e laterais dessas bolhas. Tais medições tendem a permitir uma melhor compreensão do comportamento e do formato de bolhas de Taylor, ascendendo em tubos cilíndricos inclinados, e

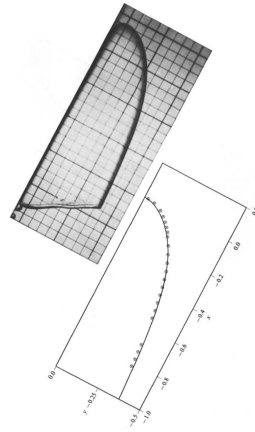


Figura 4: Comparação entre o formato de bolha bidimensional observado em fotografia (Maneri, 1970) e aquele obtido por simulação numérica (Couet e Strumolo, 1987), para $\theta = 30^\circ$.

de como isso pode ter influência sobre parâmetros interfaciais das bolhas, tais como U_θ .

2. APARATOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos foram realizados usando-se colunas verticais e inclinadas de líquido estagnado, instaladas no Laboratório de Termo-Hidráulica Experimental David Adjuto Botelho (LTE/IEN/CNEN) e que consistiram de tubos cilíndricos de acrílico com 2,0 m de comprimento e diâmetros internos de 0,019; 0,024 e 0,034 m, fechados nas extremidades por tampões de borracha. A bolha de Taylor foi formada através da inversão do tubo parcialmente cheio com o líquido de trabalho, onde foi deixado um bolsão de ar de comprimento L_0 . A Figura 5 apresenta um desenho esquemático destas colunas.

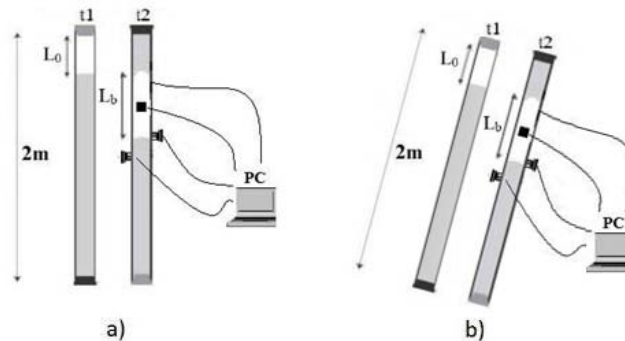


Figura 5: Diagrama esquemático das colunas de líquido estagnado com tubos de acrílico: a) Vertical; b) Inclinada.

Os tubos de acrílico foram fixados em suportes metálicos que, por sua vez, estavam fixados em um sistema que permite o seu giro em 360° e, conseqüentemente, o seu posicionamento no ângulo de trabalho desejado. O ângulo de inclinação de cada experimento foi determinado através da utilização de um medidor de inclinação digital.

O sistema ultrassônico de alta velocidade consiste de uma placa geradora multiplexadora, transdutores e um computador (PC) com um programa em LabVIEW para controlar o sistema de medição e com capacidade de trabalhar com até quatro transdutores (4 canais), nos modos pulso-eco ou transmissão. Os transdutores utilizados foram os da marca Olympus do tipo piezoelétrico Modelo V112, de 10 MHz e com 6,35 mm de diâmetro. Esses transdutores foram posicionados ao longo dos tubos, com distâncias de 0,05 m entre eles e localizados, respectivamente, à 0,60; 0,65; 0,70 e 0,75 m do topo do tubo. Foi, também, imposta uma defasagem radial de 90° , entre eles (regiões inferior, superior e laterais do tubo).

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Foram estudadas diferentes combinações de diâmetro interno do tubo ($D = 0,019$; $0,024$ e $0,034$ m) e fluidos de trabalho (água destilada pura, glicerina pura e misturas de ambos). Os ângulos de inclinação estudados foram $0^\circ/2^\circ$, $5^\circ/5^\circ/7^\circ$, $5^\circ/10^\circ/15^\circ$, em relação à vertical, e o comprimento do bolsão de ar L_0 foi fixado em $L_0 = 0,20$ m. Para cada uma destas condições (D , líquido e θ), pelo menos, dez bolhas individuais foram geradas. Assim, os resultados apresentados correspondem a valores médios de, pelo menos, dez medições de U_θ , para cada um destes conjuntos de dados. Os perfis ou formatos

das bolhas também foram determinados. Os resultados referentes às velocidades das bolhas foram apresentados de forma adimensional, através do número de Froude Fr :

$$Fr = \frac{U_{\theta}}{\sqrt{gD}}. \quad (2)$$

As propriedades dos líquidos foram calculadas através de correlações propostas por Cheng (2008) para calcular a densidade (ρ_L) e a viscosidade (μ_L) das misturas de glicerina em água na faixa de 0-100% e temperaturas variando de 0 a 100°C. Já a tensão superficial (σ_L) das misturas, foram estimadas a partir de gráficos que relacionam σ_L com a temperatura, para diferentes composições de mistura água-glicerina, entre 20 e 100°C, disponíveis em uma base de dados originalmente compilada por Miner e Dalton (1953).

A Tabela 1 apresenta as condições experimentais, incluindo as densidades (ρ_L), as viscosidades (μ_L), as tensões superficiais (σ_L) e os números adimensionais de Morton (M) e de Eotvos (EO) para cada líquido e diâmetro de tubo D utilizados. M foi introduzido através da Eq. 1, enquanto EO é definido conforme a seguir:

$$EO = \frac{\Delta\rho g D^2}{\sigma_L}. \quad (3)$$

Tabela 1: Condições Experimentais.

Percentagens em volume (A-Água; G-glicerina); $g = 9,81\text{m/s}^2$							
Líquido	D (m)	T (°C)	ρ_L (kg/m ³)	μ_L (Pa.s)	σ_L (N/m)	M	EO
100%A	0,019	29,0	995,8	0,0008	0,0702	$1,17 \times 10^{-11}$	50
80%A+20%G	0,019	30,0	1058,3	0,0015	0,0694	$1,40 \times 10^{-10}$	54
50%A+50%G	0,019	30,0	1141,6	0,0057	0,0668	$3,04 \times 10^{-8}$	60
20%A+80%G	0,019	30,0	1214,1	0,0499	0,0646	$1,86 \times 10^{-4}$	66
100%G	0,019	30,0	1257,4	0,5979	0,0626	4,06	71
100%A	0,024	24,0	997,1	0,0009	0,0708	$1,82 \times 10^{-11}$	79
80%A+20%G	0,024	26,0	1059,9	0,0017	0,0699	$2,26 \times 10^{-10}$	85
50%A+50%G	0,024	25,0	1144,2	0,0068	0,0672	$6,04 \times 10^{-8}$	96
20%A+80%G	0,024	26,0	1216,5	0,0629	0,0654	$4,51 \times 10^{-4}$	105
100%G	0,024	24,0	1261,3	0,9875	0,0628	29,86	113
100%A	0,034	26,0	996,6	0,0009	0,0711	$1,80 \times 10^{-11}$	159
80%A+20%G	0,034	29,0	1058,7	0,0016	0,0694	$1,82 \times 10^{-10}$	173
50%A+50%G	0,034	28,0	1142,7	0,0061	0,0668	$3,99 \times 10^{-8}$	194
20%A+80%G	0,034	28,0	1215,3	0,0559	0,0646	$4,68 \times 10^{-4}$	213
100%G	0,034	28,5	1258,7	0,7035	0,0626	7,8	228

3.1 A Técnica Ultrassônica de Pulso-Eco

O movimento de bolhas de Taylor num líquido pode ser detectado por transdutores ultrassônicos no modo pulso-eco devido à grande diferença entre as impedâncias acústicas das fases líquida e gasosa, o que faz com que a onda sonora incidente seja quase totalmente refletida na interface gás-líquido, conforme apresentado por Chang e Morala (1990). Processando os sinais ultrassônicos gerados em tal detecção, faz-se possível a obtenção de informações sobre a estrutura dessas bolhas e a medição de uma série de parâmetros, tais como a velocidade da bolha U_{θ} , determinada através da seguinte relação:

$$U_{\theta} = \frac{\Delta Z}{\Delta t}, \quad (4)$$

onde ΔZ é a distância entre dois transdutores e Δt é o intervalo de tempo entre os momentos em que a passagem da bolha é detectada por cada um desses dois transdutores.

Usando-se uma metodologia baseada no tempo de trânsito entre o sinal referente à parede interna do tubo, próxima ao transdutor, e os sinais referentes à interface gás-líquido da bolha, é possível medir-se a evolução, na direção axial do tubo, das espessuras dos filmes líquidos em queda ao redor das bolhas de Taylor (perfil da bolha), para uma dada posição radial, através da relação:

$$\delta = \frac{T_f c_L}{2}, \quad (5)$$

onde δ é a espessura do filme em torno da bolha de Taylor, T_f é o tempo de trânsito entre o sinal referente à parede interna do tubo e aquele referente à interface da bolha e c_L é a velocidade do som na fase líquida.

c_L pode, também, ser determinado através da relação:

$$c_L = \frac{2D}{T_{r12}}, \quad (6)$$

onde T_{r12} é o tempo de trânsito entre reflexões correspondentes à parede interna do lado do transdutor e a parede interna diametralmente oposta, com o tubo totalmente cheio com o líquido de trabalho.

Os sinais ultrassônicos obtidos foram processados através de um programa desenvolvido no LTE/IEN, que realiza os cálculos para a determinação de U_θ e δ , com base em um par de transdutores. Maiores detalhes sobre essa programação podem ser encontrados em Dos Santos *et al.* (2015). O programa abre os arquivos do tipo TXT e identifica os perfis das bolhas (interfaces gás-líquido), os narizes e as caudas das bolhas, para cada transdutor usado na aquisição dos dados. Conhecendo-se c_L , Δt , a frequência de aquisição dos dados e o número de pontos de aquisição, é possível determinar-se os parâmetros desejados através das Eqs. 4 a 6.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Figura 6 relaciona as velocidades das bolhas, apresentadas através de Fr , com os ângulos de inclinação θ , para os diferentes líquidos de trabalho (diferentes M), em cada um dos diâmetros de tubo D estudados. Verifica-se, para todos os M , que Fr aumenta com o aumento de θ , para os ângulos estudados. Além disso, Fr tende a aumentar com a diminuição de M para cada θ e a dependência de Fr com θ , para diferentes M , torna-se cada vez mais característica, à medida que aumenta-se Eo ou D , inclusive para baixos valores de M .

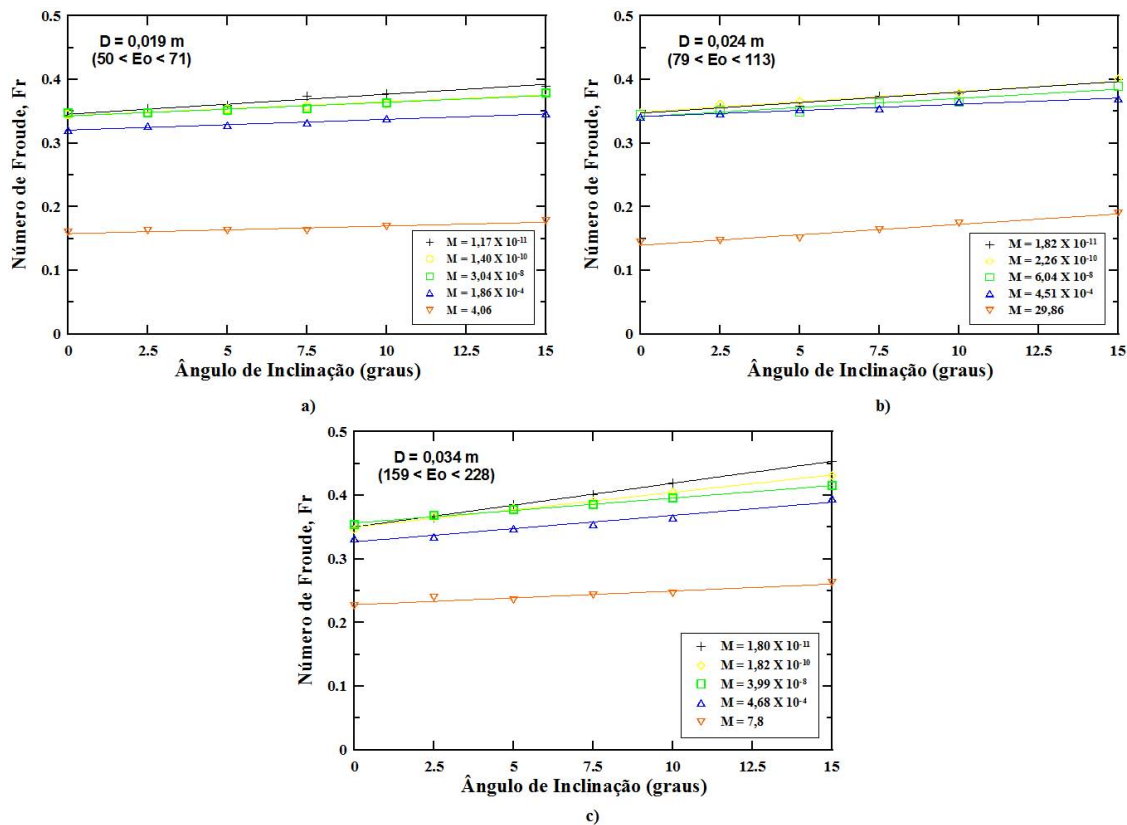


Figura 6: Fr vs θ para diferentes números de Morton M .

As diferenças entre os perfis, especialmente na parte inferior, para bolhas ascendendo em líquidos mais ou menos viscosos, apresentadas nas Figs. 2 e 3, foram observadas para os três diâmetros de tubos estudados, para ângulos entre 0° e 15° , conforme De Azevedo (2016), o que sugere que a reorganização do escoamento do líquido ao redor das bolhas, à medida que o tubo é inclinado, seria bastante influenciada pelas propriedades do líquido.

As Figuras 7a e 7b apresentam a evolução dos perfis laterais de bolhas alongadas ascendendo em tubos cilíndricos com $D = 0,019 \text{ m}$ cheios com água destilada ($M = 1,17 \times 10^{-11}$) e glicerina ($M = 4,06$), respectivamente, à medida que a inclinação θ do tubo é variada entre 0° e 15° .

Na Figura 7a, verifica-se a dificuldade encontrada pela bolha, ascendendo em líquidos menos viscosos, para expandir-se lateralmente, especialmente para $\theta \geq 5,0^\circ$, o que coincide com o início das transições mais intensas de formato, identificadas pelo transdutor posicionado na parte inferior dos tubos contendo líquidos com tais características (Vide a Fig. 3). Por outro lado, para o caso de líquidos mais viscosos (Fig. 7b), observa-se, claramente, que a bolha sofreu grandes deformações, expandindo-se, cada vez mais, para as suas laterais, à medida que a inclinação θ era aumentada.

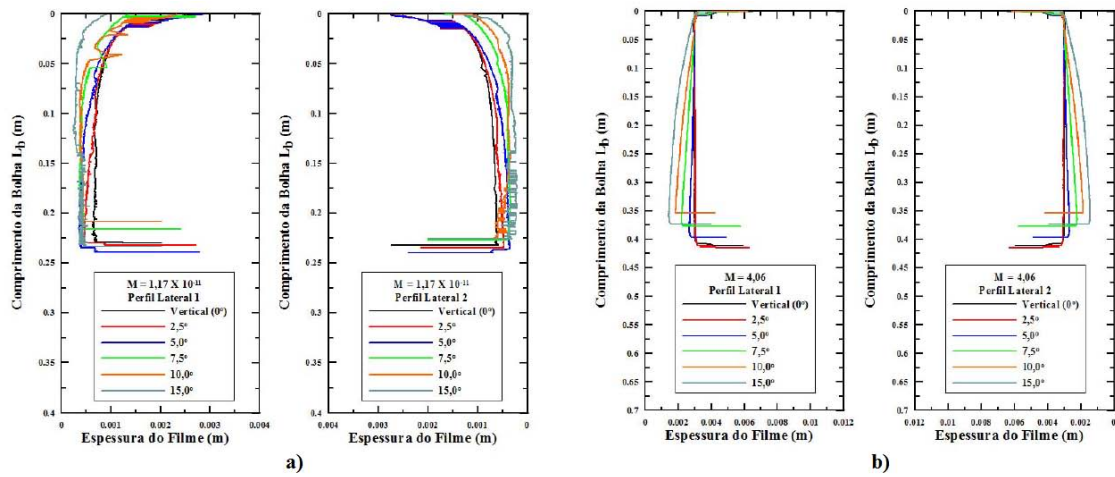


Figura 7: Perfis laterais de bolhas alongadas ascendendo em tubos cilíndricos com $D = 0,019$ m com inclinações θ entre 0° e 15° , ascendendo em: a) Água destilada ($M = 1,17 \times 10^{-11}$); b) Glicerina ($M = 4,06$).

As Figuras 8 e 9 apresentam uma comparação entre os sinais ultrassônicos obtidos a partir de um transdutor posicionado na parte superior do tubo (Perfil Superior) e aqueles relativos a transdutores posicionados nas duas laterais (Perfis Laterais 1 e 2), para bolhas geradas a partir de $L_0 = 0,20$ m, ascendendo em tubo com $D = 0,019$ m, contendo água destilada ($M = 1,17 \times 10^{-11}$) e glicerina ($M = 4,06$), em diferentes inclinações, entre 0° e 15° .

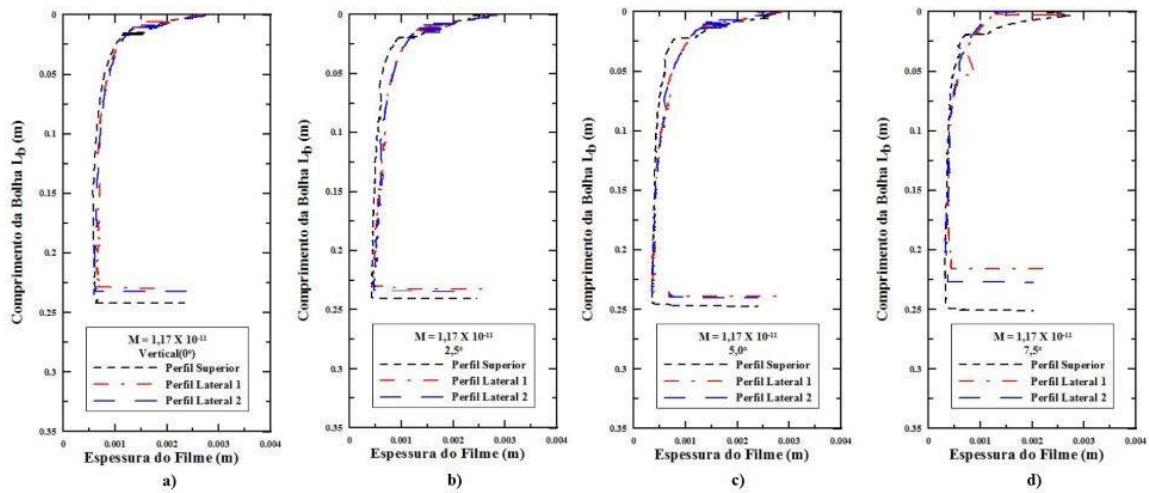


Figura 8: Comparação entre os perfis superior e laterais de bolhas alongadas ascendendo em tubos cilíndricos com $D = 0,019$ m, contendo água destilada ($M = 1,17 \times 10^{-11}$), para diferentes ângulos de inclinação θ entre 0° e $7,5^\circ$.

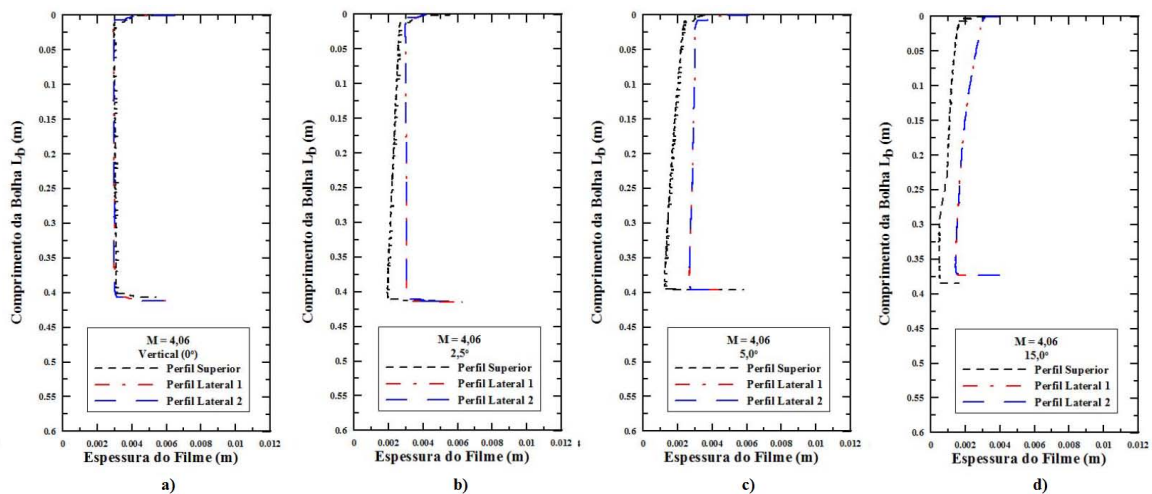


Figura 9: Comparação entre os perfis superior e laterais de bolhas alongadas ascendendo em tubos cilíndricos com $D = 0,019$ m, contendo glicerina pura ($M = 4,06$), para diferentes ângulos de inclinação θ entre 0° e 15° .

O ponto de partida, para a comparação entre os perfis superior e laterais, foi o caso vertical, onde, sabidamente, existe simetria radial e as espessuras δ dos filmes líquidos em torno de bolhas de Taylor são iguais, em todas as direções (Figs. 8a e 9a).

Quando o tubo é inclinado à $2,5^\circ$, verifica-se que a espessura do filme, na parte superior, passa a ser menor do que aquelas nas laterais, tanto para o líquido menos viscoso ($M = 1,17 \times 10^{-11}$), quanto para o mais viscoso ($M = 4,06$), como pode ser visto nas Figs. 8b e 9b.

Para $\theta \geq 5,0^\circ$, pode-se observar um comportamento diferente entre o que ocorre em líquidos menos viscosos e aquilo que se passa em líquidos mais viscosos. Enquanto a espessura δ no perfil superior permanece menor do que aquelas referentes aos perfis laterais, no caso de $M = 4,06$ (Figs. 9c e 9d), verifica-se uma tendência de sobreposição dos perfis superior e laterais, para o caso de $M = 1,17 \times 10^{-11}$ (Figs. 8c e 8d).

Os resultados apresentados nas Figs. 7 a 9, juntamente com aqueles previamente apresentados nas Figs. 2 e 3, contribuem para uma melhor compreensão a respeito do que se passa, tanto com a bolha, quanto com o filme líquido que escoar ao seu redor, quando o tubo é inclinado entre 0° e 15° . Ao ser o tubo inclinado, a bolha é empurrada pela ação da componente da força de empuxo, no sentido da parede superior. Quanto maior a inclinação, maior será a força que empurra a bolha e, conseqüentemente, maior será a resistência ao deslocamento dessa bolha, naquela direção, em função desta se encontrar no interior de um tubo cilíndrico fechado. Ao ser comprimida contra a parede, haverá, então, uma tendência da bolha deformar-se, expandindo-se para as suas laterais.

Para bolhas ascendendo em líquidos com menores M (Figs. 7a e 8), a deformação lateral da bolha encontra grande resistência, o que seria caracterizado pela sobreposição, cada vez mais evidente, dos sinais ultrassônicos obtidos por transdutores posicionados nas partes superior e laterais do tubo, à medida que o ângulo de inclinação θ aumenta. Tal sobreposição seria, também, um indício da existência de um limite mínimo para a espessura δ de filmes líquidos (δ_{limite}), escoando ao redor de bolhas de Taylor, no interior de tubos cilíndricos, o que significa dizer que, em tais condições, a bolha estaria sempre envolta por um filme líquido, com $\delta \geq \delta_{limite}$, ao menos para $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$. Além disso, a sobreposição entre os perfis superior e laterais da bolha, sugerem uma tendência, para as condições onde ela ocorre, de que todo o hemisfério superior do tubo esteja ocupado por uma parte da bolha, cercada por filme líquido com $\delta \approx \delta_{limite}$. Considerando-se que, mesmo com o aumento da inclinação do tubo, as interfaces gás-líquido da bolha não são mais capazes de se aproximarem das paredes do tubo, especialmente em seu hemisfério superior, natural se faz supor que a resistência à passagem do líquido naquela região, também, se torne maior, à medida que θ aumenta, visto que a componente da força de empuxo que empurra a bolha contra a parede superior do tubo segue aumentando. Dessa forma, faz-se necessária uma reorganização do escoamento de líquido ao redor da bolha, o que acaba se dando, de uma maneira brusca, através da sua parte inferior, onde essa resistência à passagem do líquido é menor, devido ao maior espaço entre a interface gás-líquido e a parede inferior do tubo. Essa reorganização acaba sendo cada vez mais intensa, à medida que θ aumenta, dando origem à sinuosidade observada no perfil inferior da bolha (Fig. 3a), e sugerindo que essa intensidade na reorganização do líquido exerça grande influência sobre a velocidade de ascensão da bolha U_θ , ou sobre Fr , com o aumento do ângulo de inclinação θ , para líquidos menos viscosos ($M \leq 10^{-4}$).

Já no caso de maiores M (Figs. 7b e 9), as bolhas parecem não sofrer grande resistência para deformarem-se lateralmente, uma vez que as espessuras dos filmes laterais mantiveram-se, sempre, inferiores àquelas referentes ao filme superior. Isso seria um indicativo de que as espessuras dos filmes não teriam atingido um limite e poderiam seguir expandindo-se lateralmente. Essa liberdade para deslocar-se no interior do tubo e, também, para deformar-se, permitiria, então, que a reorganização do escoamento do líquido ao redor da bolha se desse de maneira mais suave ou menos brusca. Deve-se levar em conta, também, que, em função do incremento das forças viscosas envolvidas, a movimentação do líquido, nesses casos, é mais lenta, constituindo-se em outro fator que dificulta uma reorganização mais abrupta do seu escoamento em torno das bolhas de Taylor.

As diferenças observadas no comportamento ou formato de bolhas de Taylor, no interior de tubos cilíndricos encheidos com diferentes líquidos, quando estes são inclinados, juntamente com as diferentes intensidades com que os líquidos reorganizam os seus escoamentos ao redor das bolhas, ajudam, também, a explicar o fato da influência de θ sobre Fr diminuir, à medida que se aumentam os efeitos viscosos ou aumenta-se M , conforme apresentado na Fig. 6, em concordância com observações feitas por Couet e Strumolo (1987).

5. CONCLUSÕES

Esse trabalho relatou estudos experimentais da ascensão de bolhas de Taylor individuais em tubos verticais e ligeiramente inclinados, usando-se uma técnica ultrassônica de pulso-eco. Foram medidas as velocidades U_θ de bolhas ascendendo em tubos com inclinações entre 0° e 15° e determinados os perfis das interfaces gás-líquido, nas partes inferior, superior e laterais dessas bolhas. A seguir, serão apresentadas as conclusões relativas aos resultados obtidos:

- Verificou-se que, na faixa de ângulos estudada, Fr aumentou com o aumento do ângulo de inclinação θ , para todos os fluidos, o que está em concordância com Zukoski (1966), Bendiksen (1984), Weber *et al.* (1986), entre outros.
- A velocidade da bolha U_θ , ou Fr , tende a aumentar com a diminuição de M para cada θ , dentro da faixa estudada. Além disso, a dependência de Fr com θ , para diferentes M , torna-se cada vez mais característica, à medida que aumenta-se Eu ou D , mesmo para baixos valores de M .

- Foi observado que, quando o tubo é inclinado e a bolha é comprimida contra a parede superior do tubo, há uma tendência da bolha deformar-se, expandindo-se para as suas laterais. Para bolhas ascendendo em líquidos menos viscosos, essa expansão lateral das bolhas encontrou uma resistência, que tendeu a aumentar com o aumento de θ . Já no caso de líquidos mais viscosos, as bolhas encontraram maior liberdade para deformar-se lateralmente. Essa diferença de comportamento das bolhas estaria fortemente relacionada com a reorganização do escoamento de líquido ao seu redor e seria compatível com o fato de U_θ aumentar com o aumento de θ e da influência de θ sobre Fr diminuir, à medida que se aumentam os efeitos viscosos ou aumenta-se M .

6. AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos à FINEP, ao CNPq e à FAPERJ pelo suporte financeiro.

7. REFERÊNCIAS

- Bendiksen, K.H., 1984. "An Experimental Investigation of the Motion of Long Bubbles in Inclined Tubes". *Intenational Journal of Multiphase Flow*, Vol. 10, No. 4, pp. 467–483.
- Cheng, N.S., 2008. "Formula for the viscosity of a glycerol-water mixture". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 47, No. 9, pp. 3285–3288.
- De Azevedo, M.A., Dos Santos, D., Araujo, N.N., Vinhas, P., Faccini, J. and Su, J., 2015. "Measurement of interfacial parameters of single taylor bubbles rising in closed vertical and slightly inclined tubes using ultrasonic and visualization techniques". In *Proceedings of the 23rd International Congress of Mechanical Engineering*. ABCM, Rio de Janeiro, Brazil.
- De Azevedo, M.B., 2016. *Estudos Experimentais da Ascensão de Bolhas de Taylor Individuais em Tubos Verticais e Ligeiramente Inclinados*. Tese de D.Sc., Programa de Engenharia Nuclear/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Dos Santos, D., De Azevedo, M.B., Faccini, J.L.H. and Su, J., 2015. "Estudo experimental de bolhas de taylor individuais ascendendo em coluna vertical de líquido estagnado através da técnica ultrassônica de pulso-eco". In *Proceedings of The International Nuclear Atlantic Conference*. Sao Paulo - Brazil.
- Maneri, C.C., 1970. *The Motion of Plane Bubbles in Inclined Ducts*. Ph.D. dissertation, Institute of Brooklyn, New York, USA.
- Weber, M.E., Alarie, A. and Ryan, M.E., 1986. "Velocities of Extended Bubbles Tubes in Inclined Tubes". *Chemical Engineering Science*, Vol. 41, No. 9, pp. 2235–2240.
- Zukoski, E.E., 1966. "Influence of viscosity, surface tension, and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes". *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 25, No. 4, pp. 821–837.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE SHAPES OF SINGLE TAYLOR BUBBLES RISING IN STAGNANT LIQUID INSIDE VERTICAL AND SLIGHTLY INCLINED COLUMNS BY USING A PULSE-ECHO ULTRASONIC TECHNIQUE

Marcos Bertrand de Azevedo, bertrand@ien.gov.br¹

Jose Luiz Horacio Faccini, faccini@ien.gov.br¹

Jian Su, sujian@nuclear.ufrj.br²

¹Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN), Rua Helio de Almeida, 75 - Cidade Universitaria - Ilha do Fundao - CEP 21941-906 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

²Programa de Engenharia Nuclear, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Cidade Universitaria - Ilha do Fundao - CEP 21945-970 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Abstract: *This paper presents an experimental study of single Taylor bubbles rising in vertical and slightly inclined cylindrical tubes containing stagnant mixtures of water and glycerin, using a pulse-echo ultrasonic technique. Acrylic tubes with 2.0 m in length and internal diameters of 0.019; 0.024 and 0.034 m were partially filled with liquid, leaving an air pocket length L_0 , on its top. The bubbles were generated by inverting these tubes. The angles θ studied were 0° , 2.5° , 5° , 7.5° , 10° and 15° , from the vertical position. The rising velocity of the bubbles U_θ and the bubble profiles on its bottom, top and sides were measured. Differences were found between the profiles usually described in literature, mostly characteristic of two-dimensional bubbles, and those observed in cylindrical tubes. Differences in the behavior of bubbles rising in more viscous and less viscous liquids were also identified. When the tube is inclined, the bubble is pressed against the upper wall of the tube and tend to deform, expanding to its sides. For bubbles rising in less viscous liquids such lateral expansion of the bubbles encountered a resistance that tends to increase with increasing θ . In the case of more viscous liquids, the bubbles found freedom to deform laterally. The results allow a better understanding of the behavior of bubbles, inside inclined cylindrical tubes, and their influence on interfacial parameters such as the bubble velocities U_θ .*

Keywords: *Thermo-hydraulics of Nuclear Reactors, Taylor Bubbles, Stagnant Liquid, Cylindrical Inclined Tubes, Pulse-Echo Ultrasonic Technique.*