

2009 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2009
Rio de Janeiro, RJ, Brazil, September 27 to October 2, 2009
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR - ABEN
ISBN: 978-85-99141-03-8

ESTUDO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS EM DUTO HORIZONTAL USANDO UMA TÉCNICA DE VISUALIZAÇÃO

Livia A. Oliveira¹, Bruno T. Tomas¹, Jurandyr S. Cunha Filho¹, José L.H. Faccini² e Jian Su¹

¹ Programa de Engenharia Nuclear, COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro
CP 68.509, 21945-970, Rio de Janeiro, Brasil
livia.alves.oliveira@gmail.com

² Instituto de Engenharia Nuclear - IEN / CNEN
21941-906 Rio de Janeiro, Brasil

RESUMO

O estudo da dinâmica dos escoamentos bifásicos gás-líquido é de grande importância para as áreas de energia nuclear e de petróleo e gás natural. Reconhecidos pela literatura como sendo de grande complexidade, os escoamentos gás-líquido têm recebido ao longo do tempo uma especial atenção da parte de cientistas e pesquisadores interessados no desenvolvimento de modelos teóricos, capazes de prever o comportamento desses escoamentos em termos de seus parâmetros mais importantes e de suas estruturas físicas. As velocidades das fases gás e líquido, a evolução dessas fases durante os escoamentos, as posições das interfaces gás-líquido, são alguns exemplos de parâmetros e de estruturas que requerem cuidadosos estudos experimentais e teóricos. No presente trabalho é realizado um estudo experimental de visualização de escoamentos bifásicos água-ar, estratificados e intermitentes, em um duto tubo horizontal de seção circular com 51 mm de diâmetro interno. O estudo consiste em filmar uma mistura água-ar que passa por um trecho transparente do duto, utilizando uma filmadora de alta velocidade. Em seguida, as imagens obtidas da filmagem são analisadas quadro a quadro, e desta análise são extraídos dados de altura das interfaces gás-líquido, comprimentos e velocidades de bolhas de gás. Então, estes dados são verificados com o auxílio de correlações experimentais e teóricas disponíveis na literatura.

1. INTRODUÇÃO

Os escoamentos multifásicos de fluidos têm larga aplicação na área de engenharia de reatores nucleares, com significativa importância para o controle e a segurança operacional dos reatores. Levando em conta tal relevância, o estudo dessas atividades possui a finalidade de obter maiores informações acerca do comportamento desses fluidos em situações variadas, tais como a alteração das frações dos fluidos, regimes de escoamento, entre outras variáveis, [1], [2].

A técnica de visualização por filmagem em altas velocidades, empregando filmadoras digitais, tem sido largamente utilizada nos escoamentos bifásicos gás-líquido, em aplicações que vão desde a simples observação visual de padrões destes escoamentos até a medição de seus parâmetros mais relevantes.

Bui-Dinh e Choi [3] desenvolveram uma técnica experimental de medição das velocidades instantâneas de bolhas por intermédio de filmagem em altas velocidades, em um escoamento vertical água-ar. Zaruba et al. [4] realizaram uma investigação experimental em uma coluna

de borbulhamento, empregando uma filmadora de alta velocidade para a medição dos deslocamentos de bolhas individuais e das suas velocidades. Para análise dos dados os autores utilizaram uma técnica de processamento das imagens obtidas. Recentemente Supa-Amornkul et al. [5] investigaram a corrosão em elementos combustíveis de reatores nucleares do tipo CANDU-6, através de uma simulação experimental de escoamentos bifásicos gás-líquido presentes nos canais anulares dos elementos combustíveis. Os autores empregaram a técnica de filmagem digital em altas velocidades, para estudar os efeitos da passagem dos escoamentos sobre o material dos canais de refrigeração dos elementos combustíveis. Mayor et al. [6] verificaram a adequação de uma técnica de filmagem digital para medição de parâmetros relevantes (comprimento e velocidade) em escoamentos água-ar “slug” verticais, através do estudo de incertezas associadas às medições.

A técnica de visualização por filmagem em altas velocidades tem sido também utilizada em combinação com outras técnicas para medição de escoamentos bifásicos: Morala et al. [7] empregaram esta técnica combinada com uma técnica ultra-sônica, Fairholm et al. [8] e Mishima et al. [9] utilizaram-na em conjunto com neutrografia, enquanto Fossa et al. [10] e Woods et al. [11] combinaram a filmagem digital com impedância e condutância, respectivamente.

No presente estudo foi utilizada uma técnica de visualização, cujo equipamento utilizado encontra-se descrito posteriormente neste trabalho. Uma das grandes vantagens na utilização dessa técnica é a sua propriedade de ser um método não-invasivo. Assim, pode-se assegurar que o sistema em estudo não sofre perturbações externas provenientes de instrumentos de medição, o que ocorre com certa frequência em algumas outras técnicas. Cabe ressaltar que esta não é a única técnica, tampouco a mais bem sucedida. Este estudo tem a finalidade de complementar estudos anteriores na área e servir de ferramenta para análises e estudos futuros.

2. EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Seção de Escoamentos Bifásicos

A seção de escoamentos bifásicos, Fig. 1, inicia em um misturador do tipo venturi, onde a água e o ar provenientes, respectivamente, de um circuito de água e da rede predial de ar comprimido se misturam. A vazão de água é medida por um rotâmetro (incerteza = $\pm 3\%$), quando os experimentos são com escoamentos estratificados; quando os escoamentos são intermitentes, a vazão de água é medida por um medidor do tipo turbina (incerteza = $\pm 0,5\%$). A vazão de ar é medida por um rotâmetro (incerteza = $\pm 3\%$). A mistura segue para um tubo horizontal de aço inoxidável AISI 316 com diâmetro interno de 50,8 mm e cerca de 6 m de comprimento. Depois, segue para um trecho de acrílico extrudado transparente, com o mesmo diâmetro interno do tubo de aço inoxidável e cerca de 0,6 m de comprimento. O tubo de acrílico possui uma escala linear graduada com divisões de 1,0 mm, colocada na posição horizontal ao longo do eixo axial e na parte de baixo do tubo, com a finalidade de servir como referência para avaliação dos escoamentos filmados. Para facilitar o alinhamento da filmadora, o tubo transparente também possui duas linhas com espessura de 0,30 mm cada, que foram colocadas horizontalmente sobre a superfície, ao longo do eixo axial e diametralmente opostas. Após o trecho de acrílico a mistura bifásica passa por outro tubo horizontal, idêntico ao primeiro, com 3 m de comprimento indo então para um tanque de separação e de expansão onde a água é separada do ar por gravidade, retornando ao

reservatório de água e daí ao circuito de água. O ar é exaurido para o ambiente. Todos os experimentos foram realizados no Laboratório de Termo-Hidráulica Experimental do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN).

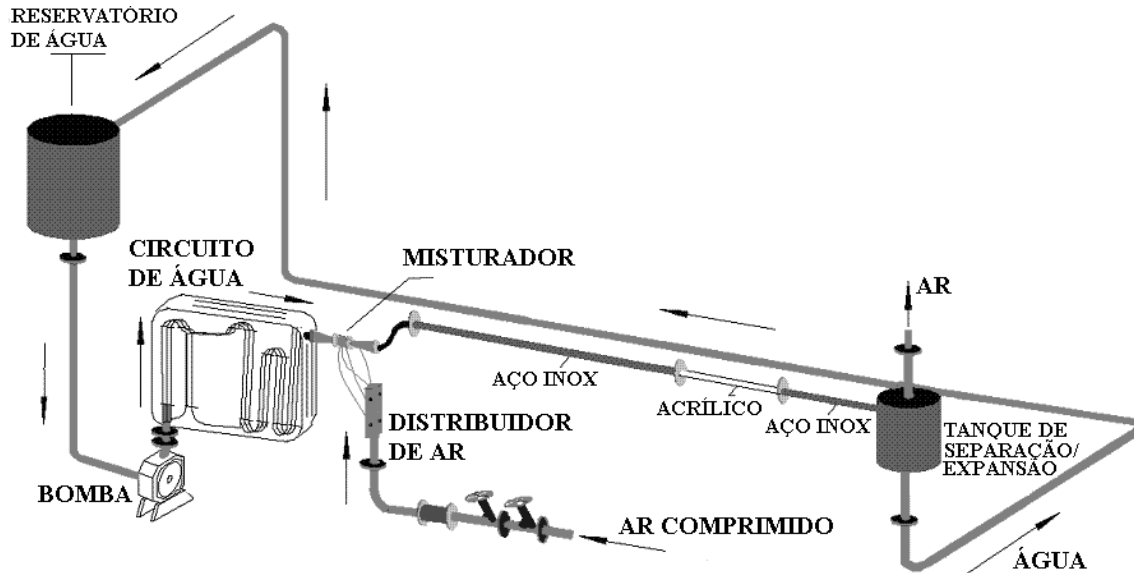


Figura 1. Seção de escoamentos bifásicos.

2.2. Equipamento de Filmagem e Iluminação

O sistema de filmagem utilizado foi da Redlake Imaging Corporation, modelo Motionscope PCI 8000S formado por uma filmadora digital monocromática de alta velocidade, modelo 1108 - 0014, equipada com um sensor CCD (resolução máxima 480 x 420 pixels) e lentes Toyo 12,5 - 75 mm, f/1,8 w Macro, uma placa controladora PCI de 12 bits, um programa de aquisição e análise de imagens e um microcomputador com processador AMD K6 800 MHz, 128 Mb de memória RAM e sistema operacional Windows NT. Essa configuração foi suficiente para atender os requisitos mínimos do sistema empregado neste trabalho. A filmadora é conectada à placa, que fica posicionada no barramento PCI do microcomputador, por meio de um cabo de potência tipo 44-pin. Dispositivos de suporte e fixação completam o sistema, que tem capacidade para gravar imagens preto e branco com velocidades de 50 até 8000 quadros por segundo.

A iluminação necessária para filmagem foi fornecida por um refletor Lowel PRO 250 W e outro Sargent 1000 W, colocados acima e lateralmente em relação a lente da filmadora e orientados para o trecho de acrílico da seção de testes. Também foi posicionado um fundo branco, por detrás do tubo transparente, com a finalidade de melhorar o contraste das imagens. O fabricante do sistema de filmagem fornece tabelas de capacidade de memória por modelo em termos da velocidade em quadros/s. Logo, para cada velocidade corresponde uma capacidade de armazenamento em número de quadros gravados. Então, um compromisso entre velocidade e memória precisa ser levado em conta para seleção das velocidades das

filmagens. Foi escolhida a faixa de 125 a 250 quadros/s como a mais adequada para as condições deste trabalho. Uma vista geral do sistema de filmagem é apresentada na Fig. 2.

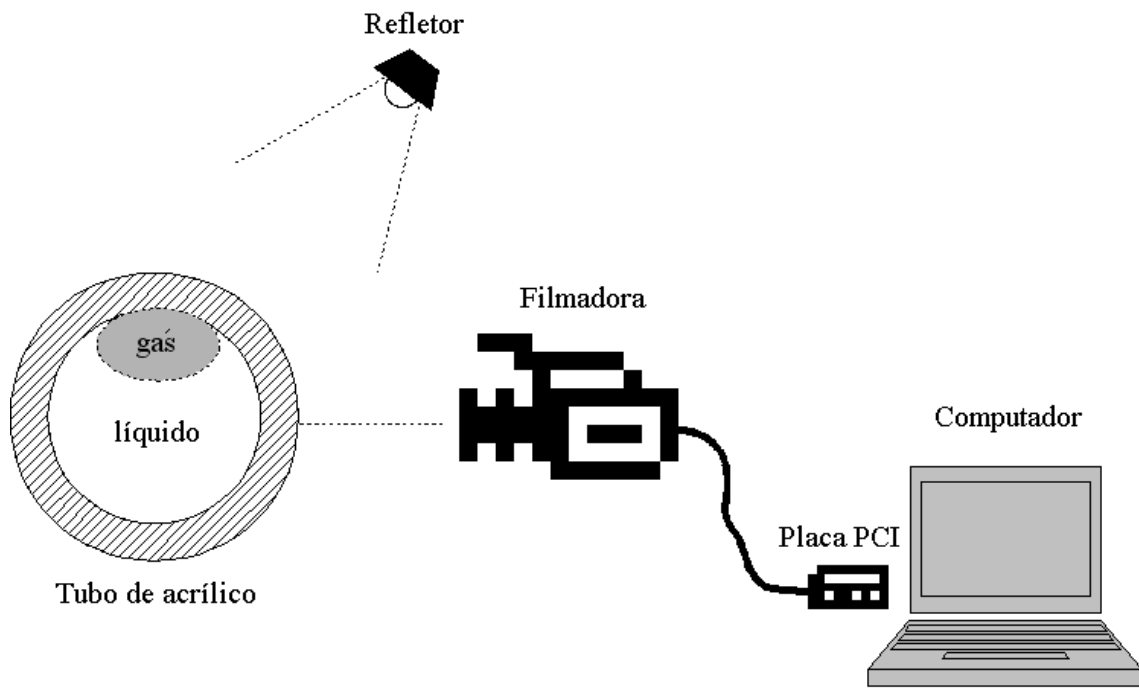


Figura 2. Montagem experimental de filmagem e iluminação.

2.2. Análise das Filmagens

A dimensão e o movimento de uma imagem foram medidos quadro a quadro, à partir do programa de aquisição e análise de imagens do equipamento de filmagem. O programa fornece o número de quadros registrados durante o tempo de duração de um experimento e apresenta um par de eixos, situados no plano de filmagem perpendicular à filmadora, que permitem ao operador determinar a posição e a velocidade de um ponto de interesse em relação à uma referência calibrada. Determinadas a posição e a velocidade de um ponto, pôde ser feito o estudo da evolução dos parâmetros de interesse dos escoamentos com o tempo. Para isto as imagens, gravadas no formato de filmes de curta duração, foram observadas em um monitor de vídeo e, a partir daí, foram analisadas as alturas de líquido nos escoamentos estratificados; e as velocidades das bolhas de gás nos escoamentos intermitentes.

3. RESULTADOS

3.1. Cálculo das Velocidades das Bolhas de Ar

Nos escoamentos intermitentes, a unidade do pistão de líquido é definida como sendo o comprimento do próprio pistão de líquido, muitas vezes com forte aeração, mais o

comprimento da bolha de ar, definido como a região entre a frente da bolha (“nariz”) e o final da bolha (“cauda”), [1]. Como o regime de escoamento é inerentemente transiente, as velocidades dos pistões de líquido e das bolhas de ar apresentam uma grande variação.

No presente trabalho, foi utilizada uma vazão igual a $8 \text{ m}^3/\text{h}$ para ambos, a água e o ar, gerando bolhas de ar de forma intermitente. A pressão de operação dos experimentos foi de 10^5 Pa .

Na Fig. 3 são apresentados alguns quadros da filmagem realizada com os escoamentos intermitentes. O intervalo de tempo entre dois quadros consecutivos foi de 20 ms.

Para o cálculo das velocidades das bolhas de ar foi utilizado o programa de aquisição e análise de imagens do equipamento de filmagem. Nas Figs. 3 e 4, nos quadros (a.1) e (b.1) foram marcados pontos de referência para o nariz e a cauda, respectivamente. Nos quadros (a.2), (a.3), (b.2) e (b.3) foi calculado, com auxílio do programa, a distância do nariz ou da cauda (conforme o caso) em relação ao ponto de referência. Os resultados obtidos são apresentados na Tab. 1.

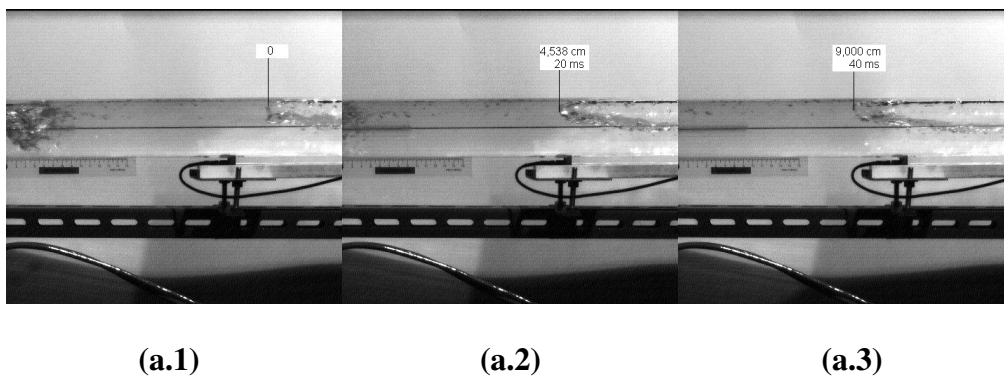


Figura 3. Progressão do nariz da bolha de ar.

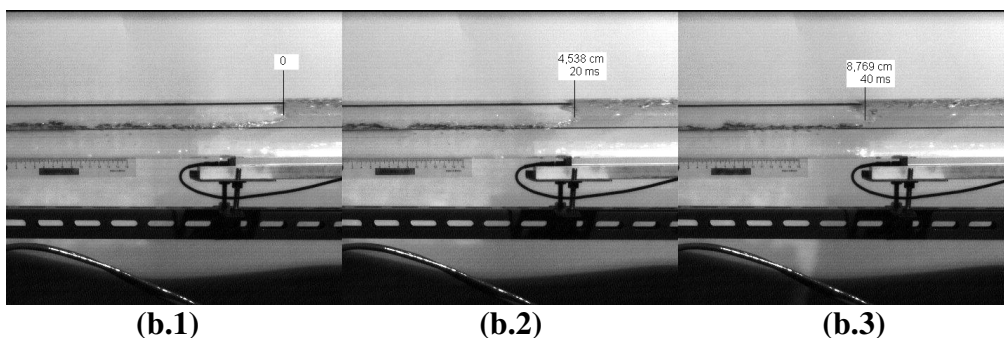


Figura 4. Progressão da cauda da bolha de ar.

Tabela 1. Distâncias e intervalos de tempo do nariz e da cauda das bolhas em relação à referência.

Quadro	Nariz (Fig. 3)		Cauda (Fig.4)	
	Δs (cm)	Δt (ms)	Δs (cm)	Δt (ms)
Referência (1)	0	0	0	0
(2)	4,5	20	4,5	20
(3)	9,0	40	8,8	40

Uma dificuldade encontrada foi obter com boa exatidão a real posição da cauda de uma bolha de ar, devido ao seu comportamento ser bastante instável, como pode-se ver na Fig. 5.

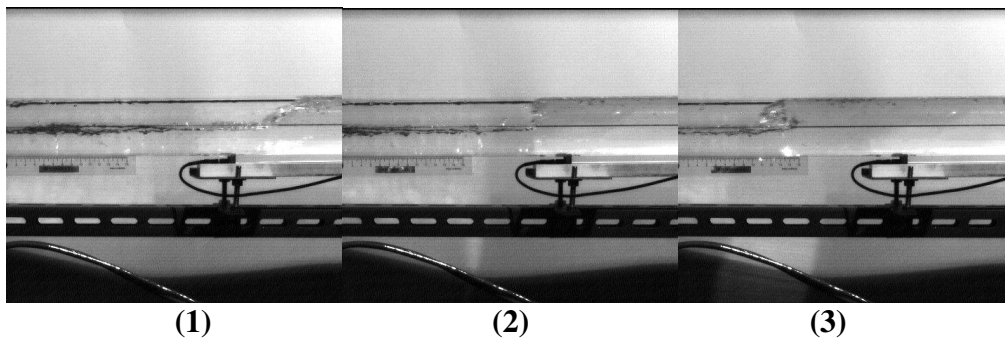


Figura 5. Comportamento instável da cauda de uma bolha de ar:
(1) $\Delta t = 0$ ms, (2) $\Delta t = 36$ ms e (3) $\Delta t = 72$ ms.

O procedimento de cálculo foi realizado para três diferentes bolhas filmadas. Foi calculada a velocidade do nariz da bolha, V_N , e a velocidade da cauda da bolha, V_C . A velocidade V da bolha foi então calculada como sendo:

$$V = \frac{V_N + V_C}{2} \quad (1)$$

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Velocidades das bolhas de ar

Bolhas de ar	I (m/s)		II (m/s)		III (m/s)	
	V _N	V _C	V _N	V _C	V _N	V _C
Δt (ms)						
20	2,19	2,89	2,19	2,50	2,19	2,27
40	2,23	2,96	2,10	2,81	2,08	2,15
60	2,12	2,69	2,15	2,85	2,23	1,96
80	2,23	2,81	2,20	2,50	2,04	2,31
Média	2,19	2,84	2,16	2,67	2,14	2,17
V	2,52		2,42		2,16	

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo experimental de visualização de escoamentos bifásicos água-ar, estratificados e intermitentes, em um duto tubo horizontal de seção circular. A técnica de visualização empregada foi a filmagem em altas velocidades dos escoamentos, utilizando uma filmadora digital. As velocidades das bolhas de gás foram medidas através da análise das imagens obtidas, quadro a quadro, dos escoamentos. Os resultados obtidos indicam uma adequação dos procedimentos experimentais aos escoamentos simulados. Entretanto, uma quantidade maior de dados experimentais faz-se necessária para validação da técnica empregada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à FAPERJ pelo apoio recebido durante a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

1. G. B. Wallis, *One-dimensional Two-Phase Flow*, McGraw Hill Book Company (1969).
2. P. B. Whalley, , *Two-Phase Flow and Heat Transfer*, Oxford Chemistry Primers, 42, Oxford Science Publications, Oxford (1996).
3. T. Bui-Dinh e T.S. Choi, “Non-Invasive Measurements of Instantaneous Bubble Rise Velocity Using Digital Image Analysis”, *Mechanics Research Communications*, **28**, 4, pp. 471-475 (2001).
4. A. Zaruba, E. Krepper, H. M. Prasser and B. N. Reddy Vanga, “Experimental Study on Bubble Motion in a Rectangular Bubble Column Using High-Speed Video Observations”, *Flow Measurement and Instrumentation*, **16** , pp. 277-287 (2005).
5. S. Supa-Amornkul, F. R. Steward e D. H. Lister, “Flow Visualization Study of Two-Phase Flow in the Horizontal Annulus of the Fuel-Channel Outlet End Fitting of a CANDU Reactor”, *13th International Conference on Nuclear Engineering - ICONE13*, Beijing, China, May pp. 16-20 (2005).
6. T.S. Mayor, A.M.F.R. Pinto e J.B.L.M. Campos, “An Image Analysis Technique for the Study of Gas–Liquid Slug Flow Along Vertical Pipes—Associated Uncertainty”, *Flow Measurement and Instrumentation*, **18**, pp. 139–147 (2007).

7. E. C. Morala, D. Cheong, P. T. Wan, G. A. Irons and J. S. Chang, "Ultrasonic Wave Propagations in a Bubbly Gas-Liquid Two-Phase Flow", *Multi-Phase Flow and Heat Transfer III, Part A: Fundamentals* (1984).
8. W. H. Fairholm, G. D. Harvel, J. C. Campeau and J. S. Chang, "Visualization of Two-Phase Interfaces in Natural Circulation by Real-Time Neutron Radiography", *Proc. Nat. Heat Transfer Conf.*, Minneapolis, Minnesota, July 28-31, p. 199, ANS (1991).
9. K. Mishima, T. Hibiki and H. Nishihara, "Visualization and Measurement of Two-Phase Flow by Using Neutron Radiography", *Nuclear Engineering and Design*, **175** , pp. 25-35 (1997).
10. M. Fossa, G. Guglielmini and A. Marchitto, "Intermittent Flow Parameters from Void Fraction Analysis", *Flow Measurement and Instrumentation*, **14** , pp. 161-168 (2003).
11. B. D. Woods, Z. Fan and T. J. Hanratty, "Frequency and Development of Slugs in a Horizontal Pipe at Large Liquid Flows", *Int. J. Multiphase Flow*, **32** , pp. 902-925 (2006).