



XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP  
Artigo CREEM2012

## ESTUDO DE BOLHAS ALONGADAS EM ESCOAMENTO HORIZONTAL BIFÁSICO GÁS- LÍQUIDO USANDO TÉCNICAS ÓPTICAS

**Carlos Eduardo Rodrigues, Igor Braga de Paula e Luis Fernando A. Azevedo**  
PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Curso de Engenharia Mecânica  
Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea - Rio de Janeiro, RJ - Brasil - 22451-900  
E-mail para correspondência: Lfaa@puc-rio.br

### Introdução

Os escoamentos bifásicos gás-líquido estão presentes na natureza em diversas formas como ondas, bolhas e furacões. Na indústria, as aplicações que envolvem estes tipos de escoamentos variam desde oleodutos, dutos químicos, aeronaves até reatores termonucleares.

Durante as últimas décadas, vários pesquisadores de diversos países têm estudado a formação e a movimentação de bolhas em dutos, de maneira a melhorar a eficiência no transporte simultâneo de líquidos e gases. Dependendo das vazões de líquido e gás, diferentes padrões de escoamento podem ocorrer (Bendiksen, 1984). Dentre esses padrões, existem dois que envolvem a presença de intermitente de gás e líquido na tubulação, que são os padrões de bolha alongada e golfada. O escoamento de bolhas alongadas ocorre para menores vazões de líquido e gás e é caracterizado pela existência de bolhas longas e espessas de líquido pouco aeradas. No caso de tubulações horizontais o efeito da gravidade faz com que estas bolhas estejam deslocadas em direção ao centro do duto. Já o regime de golfadas caracteriza-se por bolhas menores, mais rápidas e centradas no tubo. Além disso, o pistão é altamente aerado. A busca por melhor eficiência no transporte de gás e líquido passa pelo entendimento dos mecanismos associados a esses padrões, de modo que é importante o desenvolvimento de técnicas que permitam analisar o comportamento do escoamento.

### Objetivo

Determinar alterações na velocidade, frequência, no comprimento e no perfil frontal e traseiro das bolhas devido a variação das velocidades superficiais de gás e líquido, a fim de compreender melhor os mecanismos físicos envolvidos no fenômeno.

### Metodologia

A visualização da interface gás líquido é feita utilizando-se uma técnica óptica não intrusiva ao escoamento, conhecida como Pulsed Shadow Technique (PST). Essa técnica foi empregada anteriormente no trabalho de Nogueira et al., 2003 para o estudo de bolhas de Taylor em tubulações verticais. O método consiste em adquirir imagens de um escoamento com iluminação de fundo fornecida por uma placa de LEDs.

Os ensaios são realizados em uma bancada de testes que consiste em um tubo de 50,8 mm de diâmetro interno e de 23 m de comprimento. A entrada do tubo possui um misturador para permitir a injeção simultânea de ar e água. A tubulação é feita em Fluorinated Ethylene Propylene (FEP), que possui índice de refração próximo ao da água. A região de visualização é composta de uma caixa óptica com paredes paralelas à frente da câmera (G.F Hewitt et al. 1990). A região interna da caixa é preenchida com água para manter a continuidade do meio e evitar a deformação das imagens. As imagens do escoamento são adquiridas por uma câmera de alta frequência que é disparada por um interruptor de feixe colocado a montante da região de visualização. A visão esquemática da seção pode ser observada na Figura 1.

O experimento é feito a pressão atmosférica e vazões constantes. A velocidade superficial de gás ( $j_G$ ) e líquido ( $j_L$ ) varia de 0,7 a 1,9 e de 0,2 a 0,5 m/s, respectivamente. As diferentes combinações escolhidas permitem uma detalhada investigação do escoamento intermitente perto da transição do regime de bolhas alongadas e para o de golfadas. Em todos os casos, o número de Reynolds da mistura são superiores a 2300 e os números de Froude da mistura estão entre 1,3 e 3,4. A Figura 2 mostra a localização dos pares de velocidades superficiais testada no mapa de padrões de escoamento de (Mandhane et. al 1974).

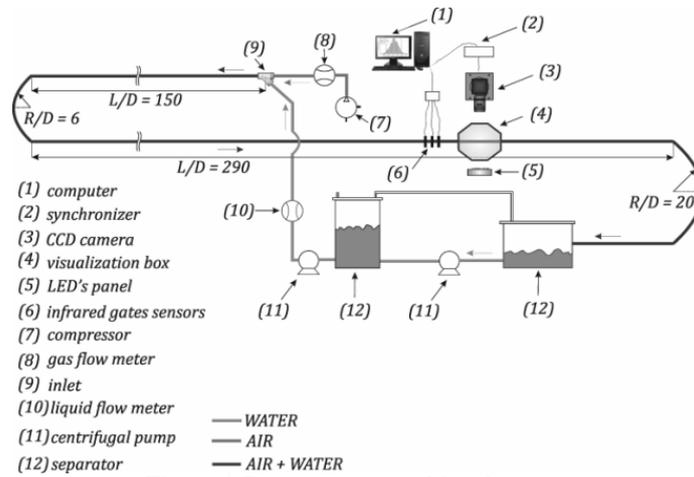


Figura 1-Imagem esquemática da seção

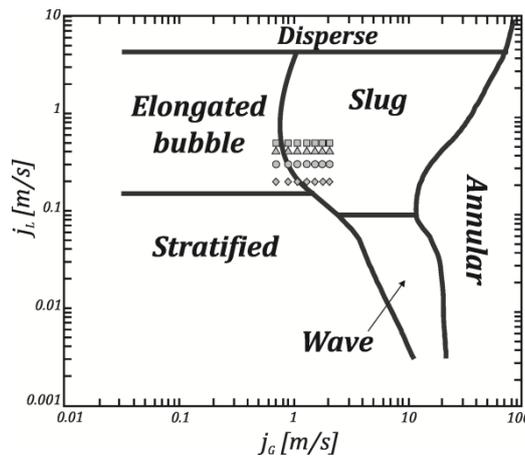


Figura 2-Localização dos pares de velocidades superficiais testados

Os números de Reynolds e de Froude estão definidos abaixo:

$$N_{Re} = \frac{\rho_l j_m D}{\mu_l} ; N_{fr} = \frac{j_m^2}{(g' D)^{\frac{1}{2}}}$$

$$g' = g \left( \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l} \right) ; j_m = j_l + j_g$$

Onde  $\rho$  é a densidade do fluido,  $j_m$  é a velocidade média de mistura,  $D$  é o diâmetro da tubulação,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido,  $g'$  é a aceleração da gravidade modificada,  $g$  é a aceleração da gravidade. Os índices  $l$  e  $g$  denominam líquido e gás respectivamente.

### Aquisição de imagens

As imagens são capturadas em pares com intervalos de tempo entre 20ms para menores velocidades superficiais e 10-15ms para maiores, na resolução espacial de 1215x646 ,com o tempo de exposição da ordem de 500 $\mu$ s, permitindo assim uma visualização nítida do escoamento.

Para a quantificação das informações contidas nestas imagens é necessário um procedimento de calibração para determinar a correspondência entre as dimensões reais no plano de visualização do escoamento e as dimensões em *pixels* na imagem. Este procedimento foi realizado com o auxílio de um alvo de calibração semicilíndrico com ranhuras de espaçamento conhecido, introduzido na seção de testes completamente preenchida com água. Ajustando-se o foco da câmera no plano do alvo de calibração e analisando as imagens das ranhuras com espaçamento conhecido, determina-se então o fator de calibração de 11 pixels/mm. A Figura 3 corresponde a imagem do calibrador utilizado.

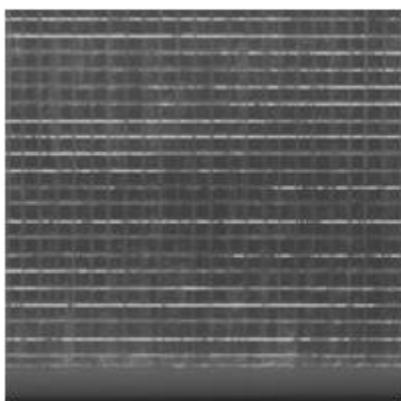


Figura 3- Calibrador com espaçamento de ranhuras conhecido.

### Processamento de Imagens

Para a determinação da velocidade da frente da bolha utiliza-se um processo onde o usuário seleciona em um programa a localização do nariz da bolha ou descarta a imagem caso ela esteja poluída pela grande quantidade de bolhas dispersas. Conhecendo o intervalo de tempo entre a aquisição dos pares de imagem, a localização do nariz da bolha e o fator de calibração é possível, então, determinar a velocidade.

A partir da localização do nariz da bolha, as imagens são recortadas num comprimento equivalente a 1 diâmetro, conforme indicado na Figura 1. Estas novas imagens têm seu fundo subtraído e, em seguida, sua intensidade de cinza normalizada. A estimação da imagem de fundo se dá através de uma imagem do tubo cheio de água.

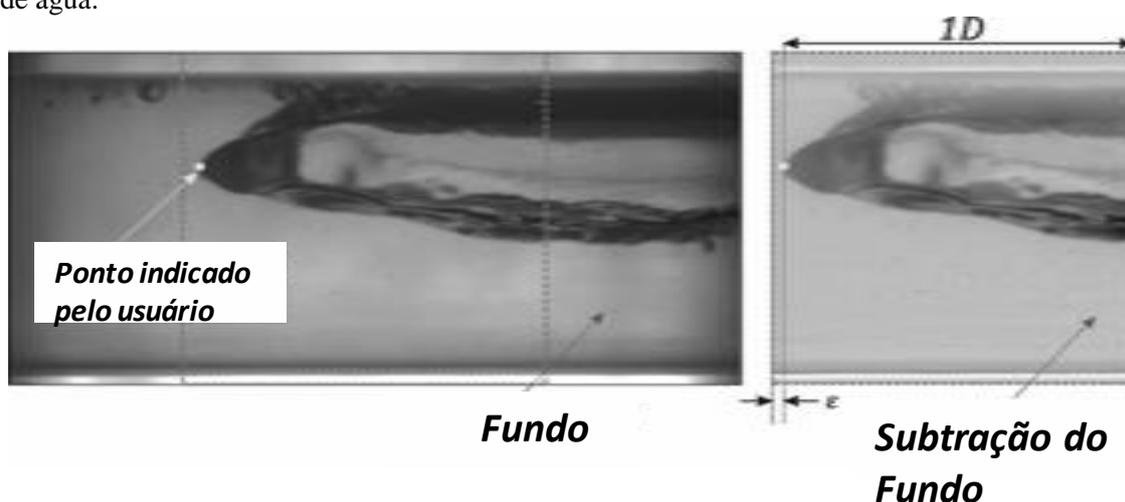


Figura 4-(a) Imagem original da frente da bolha, (b) imagem recortada com o fundo subtraído

Utilizando-se várias imagens normalizadas calcula-se uma imagem média da bolha para cada combinação de vazão de ar e água. Esta imagem média é binarizada estabelecendo-se um limiar de nível de cinza. Com isto pôde-se obter o perfil da frente de bolha, correspondendo à interface ar-água.

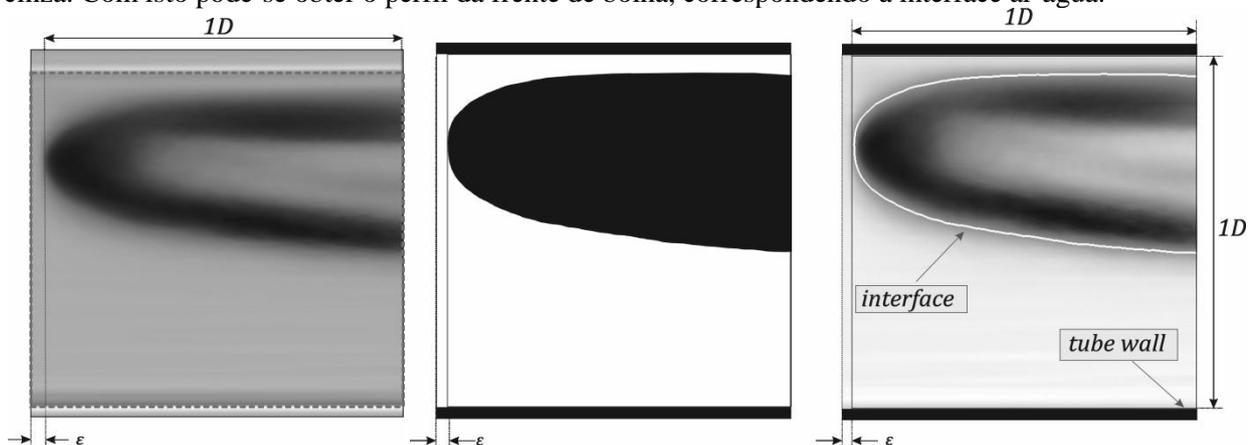


Figura 5-(a) Imagem média das bolhas de uma vazão, (b) imagem média binarizada, (c) perfil da bolha sobreposto à imagem média

O processamento de imagens da traseira da bolha foi análogo ao frontal. Ao final do processamento, após ser detectada a interface ar-água na imagem binarizada, um ajuste linear foi realizado para se estimar o ângulo da traseira, como pode ser visualizado na Figura 6.

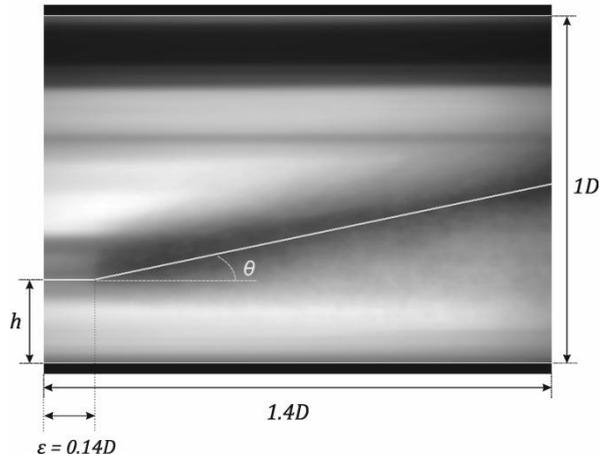


Figura 6-Perfil da traseira da bolha sobreposto à imagem média.

### Resultados

A extração da velocidade se deu através da distância entre pixels dos pontos característicos de duas imagens consecutivas e do armazenamento do intervalo de tempo entre uma imagem e outra. Na Figura 7 pode ser visualizado um comparativo entre as velocidades da frente da bolha e do pistão de líquido. De acordo com o trabalho de Woods & Hanratty, 1996, as velocidades da frente e da traseira da bolha apresentam valores próximos quando os pistões de líquido desenvolvidos. Logo, pode-se inferir que o escoamento na região de medição se encontrava bem desenvolvido.

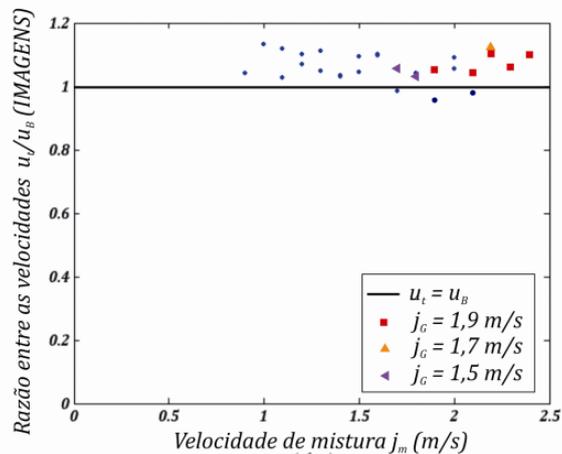


Figura 7– Razão entre as velocidades da traseira e da frente da bolha.

De acordo com Bendiksen (1984), a velocidade média de translação da frente da bolha ( $u_B$ ) no escoamento intermitente é correlacionada à velocidade de mistura ( $j_m$ ). Várias correlações estão disponíveis na literatura, sendo este tema um tópico de frequente debate: há uma falta de consenso a respeito da inclusão de termos que dependem da gravidade nas correlações de velocidade da bolha. Bendiksen (1984) e Woods & Hanratty (1996) reconhecem sua importância, enquanto autores como VanHout et al., 2002, não recomendam sua utilização, propondo que  $u_B$  e  $j_m$  estão linearmente relacionadas através da relação  $u_B = 1,2j_m$ . O gráfico da figura 8 apresenta os resultados experimentais obtidos, onde as barras verticais simbolizam a incerteza experimental inerente à técnica de processamento de imagens utilizada no cálculo da velocidade.

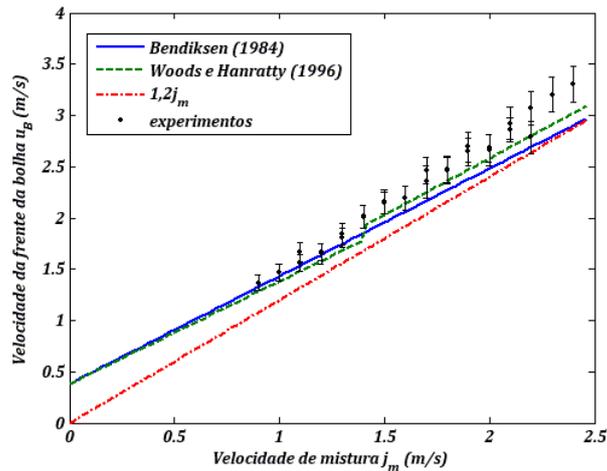


Figura8– Variação da velocidade média da frente da bolha com a velocidade de mistura.

Do gráfico, fica claro que as correlações de Bendiksen, 1984, e Woods & Hanratty, 1996, são as que se aproximam melhor dos dados experimentais, comprovando que a termos que dependem da gravidade não devem ser desprezados para baixas velocidades de mistura.

A mudança na localização do nariz da bolha reflete a relevância dos efeitos de inércia, que na medida em que se tornam mais importantes, tendem a deslocar a bolha para o centro da tubulação. Esse comportamento foi primeiramente observado por Bendiksen, 1984, de maneira qualitativa. Através do perfil frontal médio da bolha, obtido a partir das imagens, verificou-se a variação do posicionamento vertical do nariz da bolha em relação ao número de Froude.

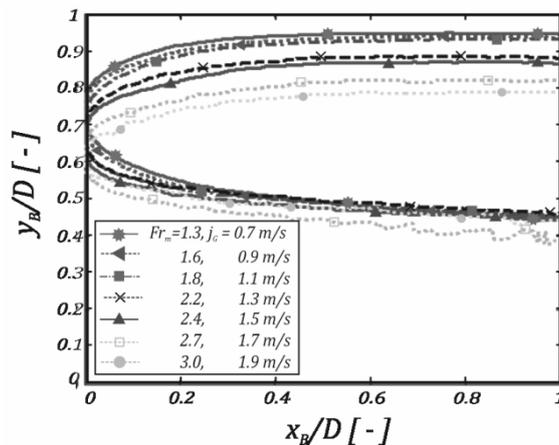


Figura 9– Perfil frontal médio da bolha para diversos números de Froude.

Na figura 10, verifica-se que o perfil médio da traseira da bolha não varia significativamente para bolhas alongadas e começa a variar ao se aproximar do regime de golfadas, de acordo com o que foi observado por Fagundes Netto et. al (1999).

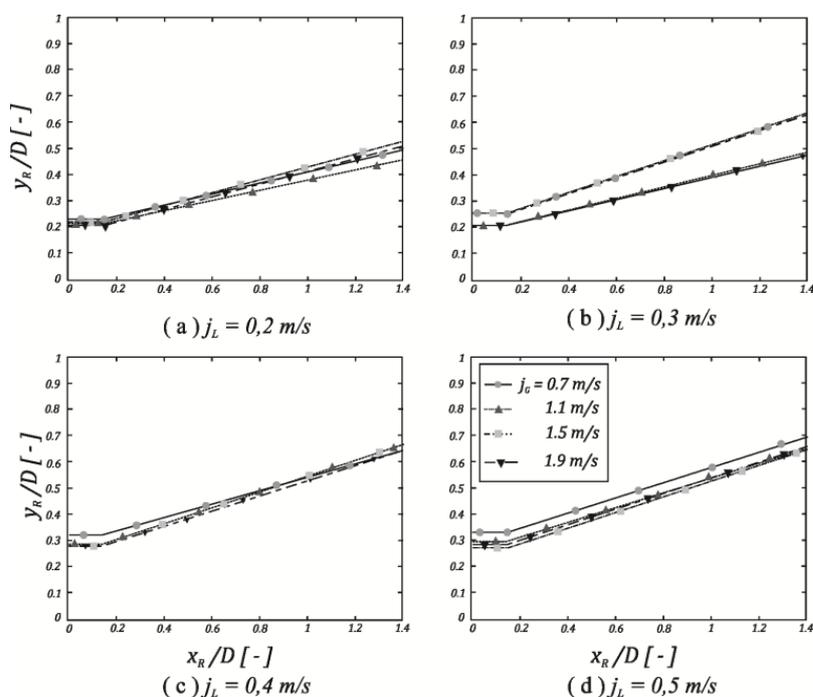


Figura 10-Perfil médio da traseira da bolha para diversos números de Froude.

## Conclusões

Foi possível extrair dados qualitativos e quantitativos através de um método óptico não intrusivo. Pela primeira vez foi possível observar quantitativamente o deslocamento vertical da posição do nariz da bolha com o número de Froude. Verificou-se também a alteração do ângulo da traseira de bolha a medida que se passa do regime de bolha alongada para o regime de golfada.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio recebido pela PETROBRAS e CNPq.

## Referências Bibliográficas

- K.H. Bendiksen, An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes, *Int. J. multiphase Flow*, vol. 10, pp467-483, 1984
- J.M. Mandhane, G.A. Gregory, K. Aziz, A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 1, pp. 537-553, 1974.
- J.R. FagundesNetto, J. Fabre, L. Paresson, Shape of long bubbles in horizontal slug flow, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 25, pp. 1129-1160, 1999.
- B.D. Woods, T.J. Hanratty, Relation of slug stability to shedding rate, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 22, pp. 809-828, 1996.
- S. Nogueira, R.G. Souza, A.M.F.R. Pinto, M.L. Riethmuller, J.B.L.M. Campos, Simultaneous PIV and pulsed shadow technique in slug flow: a solution for optical problems, *Experiments in fluids*, vol. 35, pp. 598-609, 2003.
- G. F. Hewitt, S. Jayanti, C.B. Hope, Structure of thin liquid films in gas-liquid horizontal flow, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 16, pp. 951-957, 1990.
- R. van Hout, D. Barnea, L. Shemer, Translational velocities of elongated bubbles in continuous slug flow, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 28, pp. 1333-1350, 2002.