

MÉTODO PARA CARACTERIZAÇÃO DA ASCENSÃO DE BOLHAS DE AR EM UM MEIO LÍQUIDO ESTAGNADO BASEADO EM PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Gabriel Furlan, gabriel2.furlan@usp.br¹

Alex Roger Almeida Colmanetti, alex.colmanetti@usp.br¹

Douglas Martins Rocha, douglas.rocha@usp.br²

Gherhardt Ribatski, ribatski@sc.usp.br¹

¹Heat Transfer Research Group, Escola de Engenharia de São Carlos, Av. Trab. São Carlense, 400 - Parque Arnold Schmidt, São Carlos - SP, 13566-590

²Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Rua José Lourenço Kelmer, s/n - São Pedro, Juiz de Fora - MG, 36036-900

Resumo: A presença de emulsões é frequente em diversas aplicações industriais e em especial na indústria de petróleo, na qual é recorrente a presença de emulsões óleo-água (O/A) e água-óleo (A/O) nas etapas que abrangem desde a produção e transporte até o refino. Um dos grandes desafios da produção de petróleo em plataformas off-shore, caso este que representa uma parcela expressiva dos campos de produção brasileiros, é o tratamento de águas residuais (wastewater treatment). Essa operação é amplamente aplicada em emulsões de óleo-água (O/A) geradas no processo de produção de petróleo em ambiente off-shore. As operações unitárias de floculação e flotação são utilizadas na remoção de óleo das emulsões a fim de atender o limite mensal de concentração média de óleo na água produzida de 29 mg/L em efluentes. Durante o processo de floculação/flotação, a injeção de pequenas bolhas de ar favorece a desestabilização das emulsões e consequente aglomeração do óleo, facilitando o processo de separação do óleo da emulsão (O/A). No entanto, a eficiência do processo de floculação-flotação está estritamente relacionada à distribuição, tamanho e velocidade das bolhas de ar. Além disso, a fenomenologia envolvida durante a floculação pneumática, a qual ocorre com a injeção de bolhas de ar na emulsão de óleo-água (O/A), ainda não é totalmente conhecida devido à complexidade do escoamento trifásico ar-óleo-água e os desafios inerentes a medições do diâmetro e velocidade das bolhas. Nesse contexto, um método de medição do diâmetro (d) e velocidade de bolhas (v) é apresentado nesse trabalho. O diâmetro das bolhas foi estimado por meio do processamento e análise de imagens (PAI) obtidas por uma câmera de alta velocidade modelo Phantom v2012. Já a velocidade das bolhas foi estimada por meio da aplicação da técnica de velocimetria por filtros espaciais (SFV). Os resultados obtidos por meio dessas técnicas foram comparados com modelos analítico para previsão da velocidade de ascensão de bolhas em meio infinito. De forma geral, a técnica SFV se mostrou eficaz para medição da velocidade das bolhas.

Palavras-chave: escoamento bifásico, medição de diâmetro de bolhas, velocidade de ascensão de bolhas, meio estagnado

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da estrutura do escoamento é importante tanto para escoamentos monofásicos quanto bifásicos devido aos mecanismos de transferência de calor e massa, queda de pressão e vibrações induzidas pelo escoamento estarem estritamente ligados à sua estrutura. No caso de escoamentos bifásicos, o escoamento em bolhas é comumente encontrado em diversos equipamentos industriais, como absorvedores, flotores, reatores, entre outros. A dinâmica associada a esse escoamento depende das propriedades do meio contínuo e das características das bolhas, entre elas o perfil de velocidade e a distribuição de tamanho de bolha (DTB). No caso dos flotores, os dois parâmetros influenciam no tempo de residência do fluido e na eficiência do processo. Dessa maneira, caracterizar a dinâmica do escoamento em bolha se torna uma tarefa de extrema importância.

Atualmente, existem diversos métodos para determinar a DTB, como sonda de sucção capilar, utilizada por Barigou e Greaves (1991) e Laakkonen et al. (2005); sonda de condutividade, aplicada por Liu e Bankoff (1993); sonda de fibra óptica, utilizada Saberi et al. (1995); e imagem direta (ID), utilizada por Honkanen et al. (2010) e Majumder et al. (2006). Entre essas técnicas, Honkanen et al. (2005) citam a qualidade da ID para medir uma ampla gama de tamanho de bolhas e bolhas de forma irregular com precisão. No entanto, Lecuona et al. (2000) e Rodriguez-Rodriguez et al. (2003) observam que para fração de vazio acima de 1% a quantidade de bolhas sobrepostas ultrapassa 40%, o que dificulta a detecção correta da DTB. Dessa maneira, Zhang et al. (2012) propuseram um método baseado na segmentação do contorno e posterior agrupamento dos segmentos para identificar as bolhas sobrepostas.

Estudos envolvendo a caracterização da velocidade em escoamentos bifásicos tem relevância na academia desde meados do século XX. Lorsch (1929) e Wallis (1939) foram pioneiros nas medições de velocidade localizada utilizando técnicas visuais. Principalmente após a década de 1980, as técnicas de velocimetria a laser tornaram-se amplamente estudadas para caracterizar a estrutura do escoamento, como a Velocimetria por Laser Doppler (LDV) utilizada por Neti, Eichhorn e Hahn (1983), e Fen shen, Dong cao e Gang lu (1991); A Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV), utilizada por Iwaki et al. (2004), e Paul, Tachie e Ormiston (2007); e a Velocimetria por Filtro Espacial (SFV) utilizada por Hosokawa e Tomiyama (2012), e Hosokawa, Matsumoto e Tomiyama (2013a,b). As técnicas ópticas, por serem não intrusivas, apresentam vantagem quando comparada com outros métodos de medição de velocidade, como o anemômetro de fio quente, por não interferirem na estrutura do escoamento.

A medição do perfil de velocidade em escoamentos bifásicos é desafiadora já que a interface entre as fases gasosa e líquida leva à refração e reflexão do feixe de laser, aumentando o ruído da imagem e dificultando a visualização do escoamento. Tais dificuldades se acentuam no caso de técnicas que requerem uma elevada concentração de partículas, e.g. a técnica PIV. Dessa forma, o uso de técnicas de velocimetria óptica menos sensíveis à concentração de partículas, tais como SFV e LDV, torna-se uma estratégia promissora para o estudo de escoamentos bifásicos. No entanto, as versões tradicionais das técnicas SFV e LDV apresentam a limitação de medir a velocidade do escoamento em regiões com dimensões reduzidas e exigir sondas ópticas próximas às regiões de medição. Nesse contexto, Hosokawa e Tomiyama (2012) propuseram uma nova versão da técnica SFV baseada na série temporal das imagens de partículas que combina a precisão de técnicas baseadas no princípio de medição de tempo de voo, como LDV, o benefício de medir a velocidade de diversas partículas ao mesmo tempo, como PIV, e a versatilidade de alterar os parâmetros de análise em uma etapa de pós-processamento. Em decorrência da robustez alcançada com a técnica SFV, Hosokawa et al. (2013) empregaram de forma satisfatória a técnica SFV para a medição de velocidade de bolhas em um meio líquido. Dessa forma, a técnica SFV mostra-se promissora para a caracterização do campo de velocidade tanto da fase líquida quanto da fase gasosa em escoamentos do tipo bolhas.

Nesse contexto, o presente estudo utiliza processamento e análise de imagens (PAI) obtidas por uma câmera de alta velocidade modelo Phantom v2012 para detecção do tamanho de bolhas e, para o caso de bolhas sobrepostas, o método proposto por Zhang et al. (2012) em conjunto com o modelo de medição do perfil de velocidade para caracterizar o escoamento da ascensão de bolhas em um meio infinito.

2. METODOLOGIA UTILIZADA

Os ensaios de medição de velocidade de bolha em um meio infinito desenvolvido no presente estudo foram realizados na instalação apresentada na Fig. 1. Esse aparato experimental é integrado pelos 9 componentes listados na Tab. 1. O fornecimento de ar comprimido é realizado por um compressor Schulz® modelo SRP 3040 (1, Fig. 1). O ar comprimido é armazenado em reservatório de ar (2, Fig. 1). Então, o ar comprimido é direcionado para ser injetado na parte inferior da seção de teste ((6, Fig. 1), na qual foi instalado uma pedra porosa (7, Fig. 1) para geração de pequenas bolhas de ar no meio líquido estagnado. A seção de teste consiste em tubo de seção circular de borossilicato de diâmetro interno (d) de 165 mm e comprimento total de (h) 1140 mm. Tal tubo foi instalado verticalmente e sua dimensão estimada a partir de trabalhos similares na literatura (Haberman and Morton, 1953; Tomiyama et al., 2002) de forma a permitir que a bolha de atinja sua velocidade terminal de ascensão.

O controle da vazão de ar comprimido injetado na coluna de líquido através de pedra porosa se dá por meio de uma válvula de agulha Swagelok®. Um termopar tipo K e um transdutor de pressão absoluto da Danfoss® MBS 33 foram instalados a montante da injeção de ar na seção de teste (4 e 5, Fig. 1). Os dados de pressão e temperatura foram avaliados próximo do ponto de injeção e permitem inferir a densidade do ar (par) no local de sua injeção no meio líquido. Um sistema de aquisição da National Instruments®, composto por uma placa de aquisição NI-USB-6008, e software desenvolvido em Labview (acrônimo para Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) foram utilizados na aquisição de dados de pressão e temperatura em tempo real.

A filmagem do escoamento de bolhas em um meio infinito foi realizada por meio de uma câmera de alta velocidade Phantom®, modelo v2012 (9, Fig. 1). No presente estudo, a iluminação foi realizada por dois refletores de LED com uma potência de 50 W (8, Fig. 1). As imagens foram capturadas à uma taxa de 10000 fps, com resolução de 768 x 768 pixels e uma taxa de magnificação de 1:1, resultando em uma área de captura de 21.5 x 21.5 mm². Dessa forma, imagens com resolução espacial de 28 μ m por pixel foram obtidas. Após a realização dos ensaios, as imagens capturadas foram gravadas em um dispositivo de armazenamento e posteriormente analisadas.

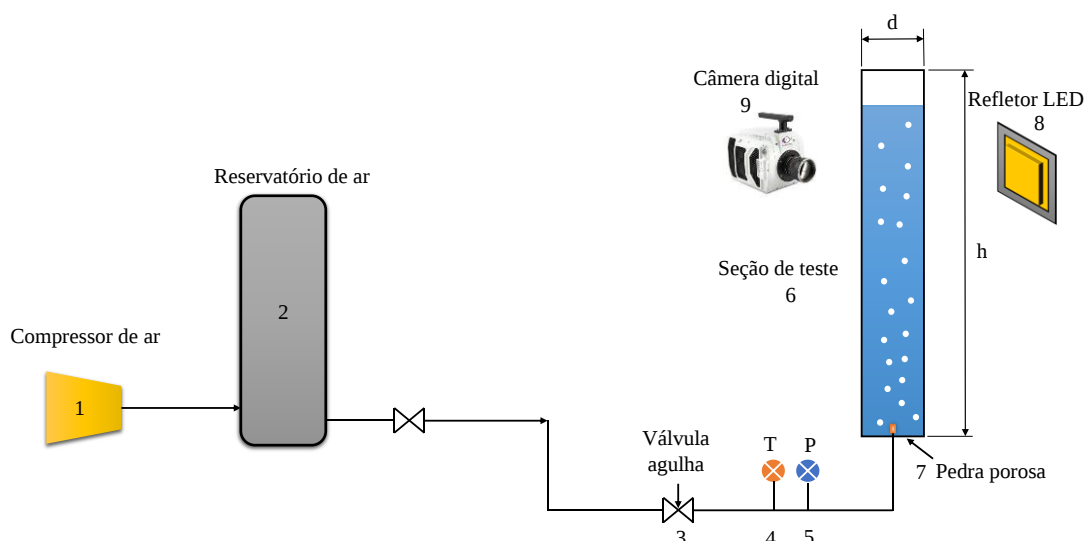


Figura 1. Desenho esquemático do aparato experimental

Tabela 1. Lista de equipamentos da instalação experimental

Equipamento	Descrição
1	Compressor Schulz® SRP 3040
2	Reservatório de ar
3	Válvula de agulha Swagelok® B-SS4
4	Termopar tipo K da Omega®
5	Transdutor de pressão absoluto Danfoss®, modelo MBS 33
6	Coluna de líquido, d =165 mm e h = 1140 mm
7	Pedra porosa
8	Refletor LED 50 W
9	Câmera de alta velocidade Phantom® v2012

2.1. Medição da velocidade das bolhas

A velocidade ascendente das bolhas em um meio infinito foi estimada por meio da técnica SFV, tal como ilustrado na Fig. 2. O processo de análise consistiu na extração individual de cada imagem sequencial, aplicação de filtro Laplaciano com kernel 5x5 para detecção de contornos, e definição de áreas de interrogação para aplicação da técnica SFV. Tal metodologia foi aplicada de acordo com o estudo de Hosokawa et al. (2013), no qual obtiveram resultados de velocidade de bolhas com maior precisão quando destacado o contorno das bolhas.

Após a definição das áreas de interrogação o método SFV foi aplicado em cada região. Tal como ilustrado na Fig. 2, inicialmente filtros espaciais periódicos foram sobrepostos às imagens capturadas via software na direção horizontal (F_{sfx}) e vertical (F_{sfy}) para a geração de incrementos e decréscimos da intensidade luminosa $I(x,y,t)$. Posteriormente à aplicação dos filtros, as regiões de interrogação foram integradas no plano xy, resultando em um sinal da variação da intensidade luminosa na região de interrogação ao longo do tempo. Os sinais obtidos da integração da intensidade luminosa nas regiões de interrogação variam periodicamente ao longo do tempo proporcionalmente ao espaçamento dos filtros espaciais (L_x e L_y) e à velocidade de translação da bolha. Por meio de uma transformada Wavelet do sinal obtido pode-se definir a frequência dominante do sinal e, consequentemente, definir a velocidade da bolha em x e em y. A determinação das velocidades por meio da técnica SFV foi realizada por meio da utilização de códigos elaborados em C++ desenvolvidos pelo grupo de pesquisa do Professor Akio Tomiyama da Universidade de Kobe.

2.2. Modelo de Zhang et al. (2012)

O modelo de Zhang et al. (2012) foi utilizado para a obtenção do diâmetro para bolhas sobrepostas. Inicialmente, a imagem é binarizada e o contorno é extraído e suavizado para eliminar ruídos. O filtro da forma Wavelet foi aplicado em todas as frequências para suavizar o contorno. Na segmentação dos contornos, utiliza-se uma aproximação poligonal para detectar os pontos dominantes pela estimativa de curvatura local. Dessa maneira, os pontos formando segmentos côncavos

entre os pontos dominantes são considerados como ponto de conexão entre as bolhas, conforme ilustrado na Fig. 3 segundo círculos em vermelho.

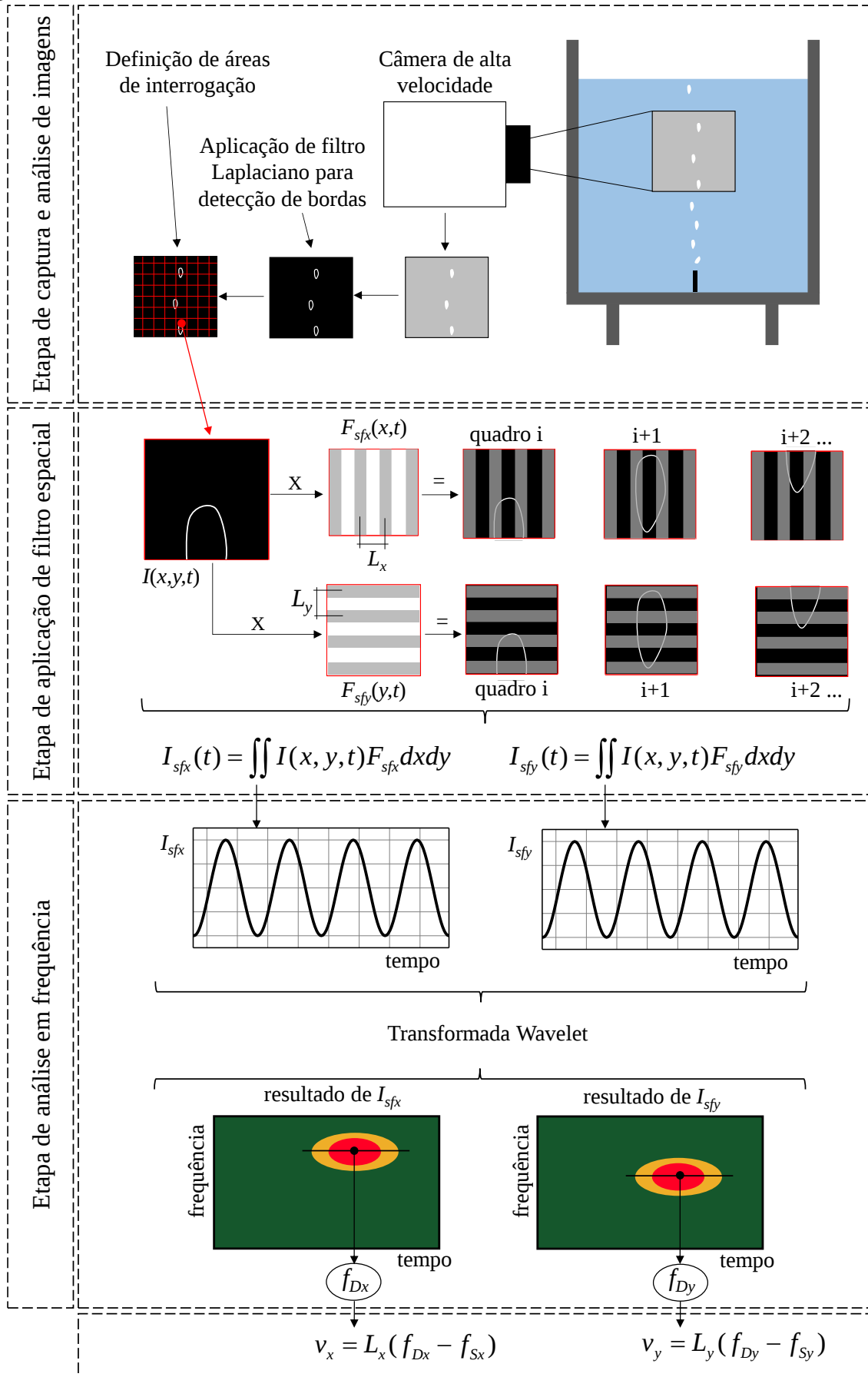


Figura 2. Etapas para utilização da técnica SFV

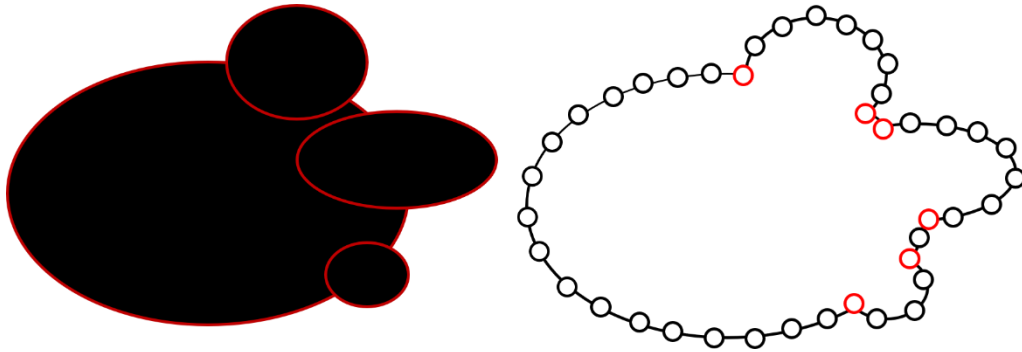


Figura 3. Ilustração do método da obtenção dos pontos côncavos pelo método de Zhang et al. (2012)

A última etapa consiste no agrupamento dos seguimentos, os quais são agrupados considerando o valor do desvio da distância média entre eles. Duas restrições são consideradas para evitar possíveis problemas na análise das imagens: i) apenas o segmento mais próximo será agrupado em uma direção e ii) segmentos agrupados com ângulo total inferior a 90° são omitidos. A primeira restrição evita que dois seguimentos satisfaçam o critério do desvio da distância média e sejam agrupados na mesma direção, considerando apenas aquele que obteve o menor valor. Já a segunda restrição foi imposta pelos autores para evitar desvios elevados na estimativa dos parâmetros da bolha. A descrição detalhada do código pode ser encontrada no artigo dos autores.

2.3. Velocidade Terminal das Bolhas

Um dos estudos iniciais de velocidade de ascensão de bolhas em meio infinito consiste na lei de Stokes, a qual considera um balanço entre as forças de arrasto e de empuxo para determinar a velocidade terminal conforme Eq. 1. Essa equação é válida para bolhas esféricas de tamanho reduzido, quando os efeitos de viscosidade predominam.

$$V_t = \frac{2g(\rho_l - \rho_g)R_b^2}{9\mu_l} \quad (1)$$

onde g consiste na aceleração da gravidade, ρ_l e ρ_g as densidades da fase líquida e gasosa, respectivamente, R_b o raio da bolha e μ a viscosidade do meio infinito. Tomiyama et al. (2002) estudaram o efeito da velocidade terminal de bolhas em ascensão em meio infinito quando os efeitos da tensão superficial são relevantes. Os autores citam a condição de diâmetro de bolhas entre 1,3 e 6 mm em um sistema água-ar a temperatura e pressão atmosféricas. Nesse caso os autores sugerem utilizar a seguinte relação para a velocidade terminal:

$$V_t = \sqrt{\left(\frac{2\sigma}{\rho_l d} + \frac{\Delta p g d}{2}\right)} \quad (2)$$

Para bolhas de tamanho intermediário, os efeitos de inércia, tensão superficial, viscosidade e pureza da água são importantes. Peebles e Garber (1953) sugeriram quatro regiões distintas para analisar a velocidade terminal das bolhas, resumidas na Tab. 2. A primeira região consiste na hipótese seguida pela lei de Stokes (Eq. 1). Os autores definem os limites de aplicação de cada região em função dos seguintes grupos adimensionais:

Tabela 2. Velocidade terminal de bolha em líquido de acordo com Peebles e Gaber (1953)		
	Velocidade Terminal	Limite de aplicação
Região 1	$V_t = \frac{2g(\rho_l - \rho_g)R_b^2}{9\mu_l}$	$Re_b < 2$
Região 2	$V_t = 0.33g^{0.76} \left(\frac{\rho_l}{\mu_l}\right)^{0.52} R_b^{1.28}$	$2 < Re_b < 4.02G_1^{-0.214}$
Região 3	$V_t = 1.35 \left(\frac{\sigma}{\rho_l R_b}\right)^{0.50}$	$4.02G_1^{-0.214} < Re_b < 3.10G_1^{-0.25}$ ou $16.32G_1^{0.144} < G_2 < 5.75$
Região 4	$V_t = 1.18 \left(\frac{g\sigma}{\rho_l}\right)^{0.25}$	$3.10G_1^{-0.25} < Re_b$ $5.75 < G_2$

$$Re_b = \frac{2\rho_l v_\infty R_b}{\mu_l} \quad (3)$$

$$G_1 = \frac{g\mu_l^4}{\rho_l \sigma^3} \quad (4)$$

$$G_2 = \frac{gR_b^4 v_\infty^4 \rho_l^3}{\sigma^3} \quad (5)$$

3. RESULTADOS

A Figura 4 apresenta as imagens das bolhas para duas vazões de ar (I e II) impostas durante o experimento. Com o controle da vazão realizado pela válvula de agulha a montante da seção de testes, obteve-se dois diâmetros distintos para análise. O método de Zhang et al. (2012) foi aplicado para determinação do contorno e diâmetro das bolhas e seu resultado está ilustrado na Fig. 4. A Figura 5 apresenta as medições dos diâmetros para a condição de vazão I, com uma predominância de bolhas e diâmetros reduzidos. As bolhas apresentaram um diâmetro médio de 18,75 pixels o que resulta em 0,525 mm, considerando a resolução da filmagem de 28 μ m/pix. A condição de vazão II apresentou um diâmetro médio de 1,12 mm.

Conforme indicado na Fig. 2, a etapa de detecção de bordas consiste na primeira análise a ser feita para utilização do método SFV. Assim, o próximo passo consiste em definir as áreas de interrogação e, para esse experimento, a imagem foi dividida em sete áreas de análise na vertical e uma na horizontal, já que o objetivo do trabalho é a medição da velocidade de ascensão das bolhas. A Figura 6 ilustra os resultados de frequência com o tempo na sétima janela de análise, para as condições I e II. Após a aplicação da fórmula final para encontrar as velocidades em cada área de análise, obteve-se uma velocidade média das bolhas de 0,04 e 0,16 m/s, respectivamente. As Tabelas 3 e 4 apresentam as velocidades medidas em cada janela de análise, e a quantidade de pontos utilizadas para o cálculo. Observa-se que a velocidade das bolhas tende a permanecer constante entre as janelas, indicando a velocidade terminal de ascensão. Utilizando o modelo proposto por Peebles e Garber (1953), ambas as condições experimentais se encontram na região 2 (vide Tab. 2), o que resulta em velocidades terminais de ascensão iguais a 0,06 e 0,16 m/s.

As imagens que representam a condição I apresentaram uma qualidade inferior a condição II, caracterizada por uma menor nitidez na definição das bordas das bolhas. Esse fato resulta em uma margem de erro superior na etapa de tratamento das imagens, com uma tendência de aumento do valor do diâmetro calculado em comparação ao valor real. Como efeito de comparação, para um diâmetro médio de 0,425 mm (0,1 mm inferior ao calculado), a velocidade de ascensão calculada por Peebles e Garber (1953) se equiparia ao valor obtido pelo método SFV. Comparou-se a velocidade média de uma bolha realizando o rastreamento dela ao longo de uma sequência de imagens. Para a condição de vazão II, a qual apresenta um diâmetro de bolha uniforme, a velocidade obtida por esse método foi também de 0,16 m/s. Para a condição I, devido a maior dispersão dos diâmetros, a velocidade variou de 0,35 a 0,60 m/s. Os resultados obtidos também foram comparados com o trabalho experimental de Haberman and Morton (1953) e apresentaram resultados similares, ilustrados na Fig. 8.

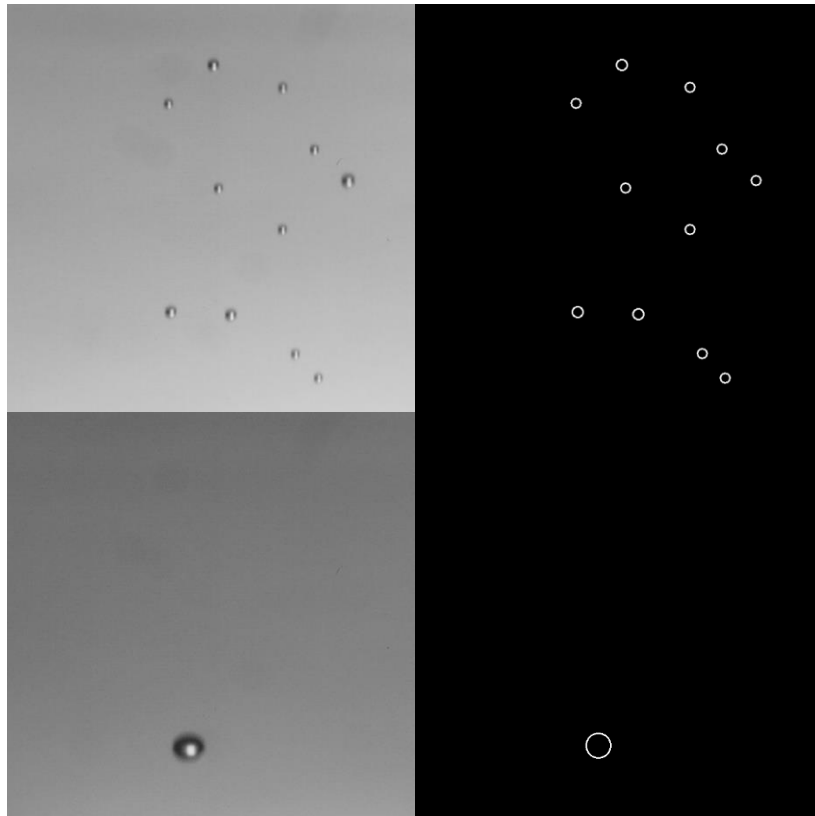


Figura 4. Imagem feita pela câmera de alta velocidade e tratada pelo método de Zhang et al. (2012)

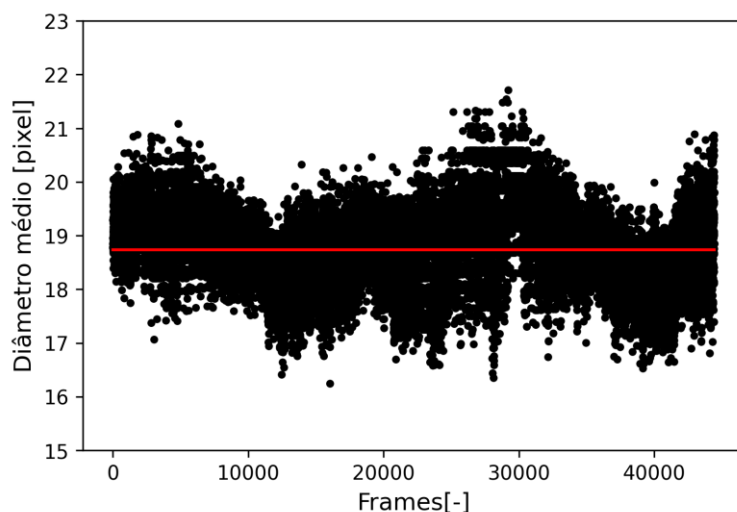


Figura 5. Diâmetro médio das bolhas em cada frame para condição I

Tabela 3. Velocidade das bolhas em cada região de análise para condição I

X	Y	V[m/s]	v'[m/s]	N
1	1	0,0383938	0,0109784	4145
1	2	0,0368904	0,0109782	3100
1	3	0,0387243	0,0117979	3933
1	4	0,0390333	0,0115544	3421
1	5	0,0415528	0,0112517	4077
1	6	0,0405897	0,0103826	4258
1	7	0,0408181	0,0109828	3631

Tabela 4 Velocidade das bolhas em cada região de análise para condição II

X	Y	V[m/s]	v'[m/s]	N
1	1	0,178136	0,148209	2019
1	2	0,159871	0,0108652	2701
1	3	0,158574	0,00871819	2866
1	4	0,157312	0,0098677	2983
1	5	0,154601	0,0215594	3014
1	6	0,151208	0,0425273	3147
1	7	0,152046	0,036358	2914

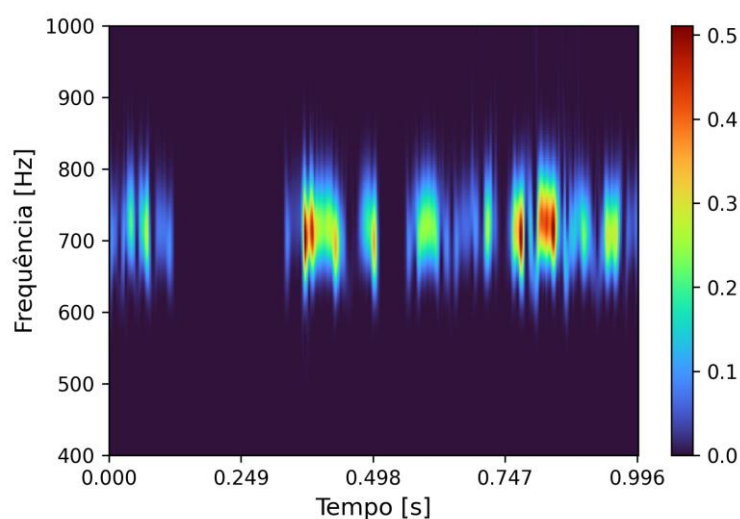


Figura 6. Resposta da frequência com o tempo após a transformada wavelet

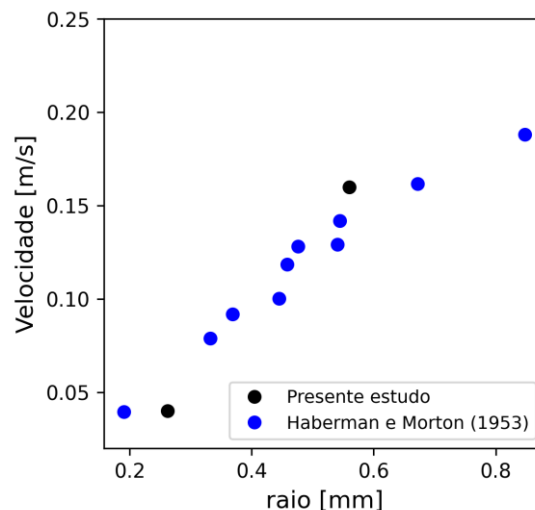


Figura 7. Comparação da velocidade terminal das bolhas obtida no presente estudo e por Haberman e Morton (1953)

4. CONCLUSÃO

O presente estudo utilizou a técnica proposta por Zhang et al. (2012) para detecção das bolhas e a técnica de velocimetria por filtros espaciais para análise das velocidades das bolhas. A técnica SFV se mostrou eficaz para medição das velocidades, com os valores obtidos apresentando resultados similares com a técnica de rastreamento de bolhas por frames e com o modelo proposto por Peebles e Garber (1953). As velocidades terminais das bolhas também apresentaram resultados similares ao obtido por Haberman e Morton (1953).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores também agradecem à Petrobrás e à ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) pelo apoio financeiro, ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo auxílio modalidade Bolsa de Produtividade em Pesquisa Processo nº 312337/2021-3 e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

6. REFERÊNCIAS

- Barigou and Greaves, 1991. M. Barigou, M. Greaves A capillary suction probe for bubble size measurement Meas. Sci. Technol., 2 (1991), pp. 318-326.
- Darzi, M. and Park, C. (2017). Optical distortion correction of a liquid-gas interface and contact angle in cylindrical tubes. Physics of Fluids, 29(5), 052004.
- Fen Shen, Y.; Dong Cao, Z.; Gang Lu, Q. An investigation of crossflow mixing effect caused by grid spacer with mixing blades in a rod bundle. Nuclear Engineering and Design, v. 125, n. 2, p. 111-119, 1991.
- Haberman, W. L., & Morton, R. K. (1953). An experimental investigation of the drag and shape of air bubbles rising in various liquids. David Taylor Model Basin Washington DC.
- Honkanen, M., Eloranta, H., Saarenrinne, P., 2010. Digital imaging measurement of dense multiphase flows in industrial processes. Flow Meas. Instrum. 21, 25–32.
- Honkanen, M., Saarenrinne, P., Stoor, T., Niinimäki, J., 2005. Recognition of highly overlapping ellipse-like bubble images. Meas. Sci. Technol. 16, 1760–1770.
- Hosokawa, S.; Matsumoto, T.; Tomiyama, A. Measurement of bubble velocity using spatial filter velocimetry. Experiments in Fluids, v. 54, n. 6, p. 1538, 2013a.
- Hosokawa, S.; Matsumoto, T.; Tomiyama, A. Tomographic spatial filter velocimetry for three-dimensional measurement of fluid velocity. Experiments in Fluids, v. 54, n. 9, p. 1597, 2013b.
- Hosokawa, S.; Tomiyama, A. Spatial filter velocimetry based on time-series particle images. Experiments in Fluids, v. 52, n. 6, p. 1361-1372, 2012.
- Iwaki, C.; Cheong, K. H.; Monji, H.; Matsui, G. PIV measurement of the vertical cross-flow structure over tube bundles. Experiments in Fluids, v. 37, n. 3, p. 350-363, 2004.
- Laakkonen, M., Moilanen, P., Miettinen, T., Saari, K., Honkanen, M., Saarenrinne, P., Aittamaa, J., 2005. Local bubble size distributions in agitated vessel: comparison of three experimental techniques. Chem. Eng. Res. Des. 83, 50–58.
- Lecuona, A., Sosa, P.A., Rodriguez, P.A., Zequeira, R.I., 2000. Volumetric characterization of dispersed two-phase flows by digital image analysis. Meas. Sci. Technol. 11, 1152–1161

- Liu, T.J., Bankoff, S.G., 1993. Structure of air–water bubbly flow in a vertical pipe-II. Void fraction, bubble velocity and bubble size distribution. *Internat. J Heat Mass Transf.* 36, 1061–1072.
- Lorisch, W. Determination of heat transfer coefficients by a diffusion method. *VDI Mitteilungen Forschungsarbeit*, v. 323, p. 46-68, 1929.
- Majumder, S.K., Kundu, G., Mukherjee, D., 2006. Bubble size distribution and gas– liquid interfacial area in a modified downflow bubble column. *Chem. Eng. J.* 122, 1–10.
- Neti, S.; Eichhorn, R.; Hahn, O. J. Laser doppler measurements of flow in a rod bundle. *Nuclear Engineering and Design*, v. 74, n. 1, p. 105-116, 1983.
- Paul, S. S.; Tachie, M. F.; Ormiston, S. J. Experimental study of turbulent cross-flow in a staggered tube bundle using particle image velocimetry. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 28, n. 3, p. 441-453, 2007.
- Peebles, F.N., Garber, H.J., 1953. Studies on the motion of gas bubbles in liquids. *Chem. Eng. Prog.* 49 (2), 88–97
- Rodriguez-Rodriguez, J., Martinez-Bazan, C.L., Montanes, J., 2003. A novel particle tracking and break-up detection algorithm: application to the turbulent breakup of bubbles. *Meas. Sci. Technol.* 14, 1328–1340.
- Saberi, S., Shakourzadeh, K., Bastoul, D., Miltzer, J., 1995. Bubble size and velocity measurement in gas–liquid systems: application of fiber optic technique to pilot plant scale. *Can. J. Chem. Eng.* 73, 253–257.
- Tomiya, A., Celata, G. P., Hosokawa, S., & Yoshida, S. (2002). Terminal velocity of single bubbles in surface tension force dominant regime. *International journal of multiphase flow*, 28(9), 1497-1519.
- Wallis, R. P. A photographic study of fluid flow between banks of tubes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, v. 142, n. 1, p. 379-387, 1939.
- Zhang, W. H., Jiang, X., & Liu, Y. M. (2012). A method for recognizing overlapping elliptical bubbles in bubble image. *Pattern Recognition Letters*, 33(12), 1543-1548.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

METHOD FOR CHARACTERIZATION OF AIR BUBBLE RISING VELOCITY IN INFINITY MEDIUM USING IMAGE PROCESSING

Gabriel Furlan, gabriel2.furlan@usp.br¹

Alex Roger Almeida Colmanetti, alex.colmanetti@usp.br¹

Douglas Martins Rocha, douglas.rocha@usp.br²

Gherhardt Ribatski, ribatski@sc.usp.br¹

¹Heat Transfer Research Group – HTRG, Department of Mechanical Engineering, São Carlos School of Engineering (EESC), University of São Paulo (USP), Av. Trabalhador São-Carlense, 400, Parque Arnold Schmidt, CEP: 13566-590, São Carlos, Brazil.

²School of Engineering, Federal University of Juiz de Fora, José Lourenço Kelmer Street, São Pedro, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brazil.

Abstract. *The presence of emulsions is commonly observed in several industrial applications, especially in the oil industry, in which the presence of oil-water (O/W) and water-oil (W/O) emulsions is notice in the stages of production to and oil transport. The treatment of water water (wastewater treatment) is a great challenge of oil production in off-shore platforms, which represents a significant portion of Brazilian production fields. The treatment unit applies the flocculation and flotation process to remove the oil from produced water in order to meet the monthly limit of average concentration of oil in produced water of 29 mg/L. During the flocculation/flotation process, the injection of small air bubbles favor the destabilization of the emulsions and agglomeration of the oil, improving the process of separating the oil from the emulsion (O/W). However, the efficiency of the flocculation-flotation process is strictly linked to the velocity and size distribution of the air bubbles. In addition, the phenomenology involved during pneumatic flocculation, which occurs with the injection of air bubbles into the oil-water (O/W) emulsion, is still under development due to the complexity of the three-phase air-oil-water flow and the challenge of performing bubble diameter and velocity measurements. In this context, a method for measuring the diameter (d) and velocity of bubbles (v) is presented in this work. The diameter of the bubbles was estimated through image processing and analysis obtained by a high-speed camera model Phantom v2012. The velocity of the bubbles was estimated through the application of the technique of velocimetry by spatial filters (SFV). The results obtained through these techniques were compared with analytical models to predict the bubble rising velocity in an infinite medium. In general, the SFV technique proved to be effective for measuring bubble velocity.*

Keywords: two-phase flow, bubble diameter, bubble rising velocity, stagnant liquid