



Simulação numérica do escoamento em mecanismos de geração de microbolhas

Numerical simulation of the flow in microbubble generation devices

Maria Eduarda Camargo¹, Henrique Stel², Moisés A. Marcelino Neto³, Larissa Maria Fernandes Gatti⁴, Rigoberto E. M. Morales⁵

RESUMO

O controle da geração de microbolhas é essencial para manter uma boa eficiência no processo de flotação, pois estas ditam o tempo e capacidade de separação de fases. Entretanto, apresentam um grande desafio em serem analisadas experimentalmente. Nesse sentido, este trabalho utiliza-se de artifício computacional, o programa comercial de CFD ANSYS® CFX®, para a solução numérica dos modelos matemáticos que descrevem o escoamento em mecanismos de geração de microbolhas. São considerados três conceitos candidatos, sendo, a partir dos resultados retirados de dados sobre o escoamento, como turbulência e perda de carga, para posterior aplicação de correlações para analisar a capacidade de geração de microbolhas de cada dispositivo assumindo alguns parâmetros de referência e possíveis influências sobre o diâmetro de bolha. Ao final, observou-se que, para pedra porosa rotativa, aumento de rotação e presença de vazão paralela reduzem o tamanho das bolhas geradas, porém maiores do que o desejável, enquanto “cap com orifício” e “Carmin®” geram microbolhas cada vez menores de acordo com o aumento da vazão ao custo do aumento da perda de carga. Por fim, o “Carmin®” apresentou-se como dispositivo mais eficiente, demandando de menor vazão para produzir microbolhas de diâmetros de interesse e queda de pressão menos pronunciada.

PALAVRAS-CHAVE: Aerador; CFD; microbolhas.

ABSTRACT

The control of the generation of microbubbles is essential to maintain a good efficiency in a flotation process, as these dictate the time and capacity of phase separation. However, they present a great challenge in being analyzed experimentally. In this sense, this work uses a computational device, the commercial ANSYS® CFX® CFD program, for the numerical solution of the mathematical models that describe the flow in mechanisms of generation of microbubbles. Three candidate concepts are considered, and, from the results taken from data on flow, such as turbulence and pressure loss, for subsequent application of correlations to analyze the capacity of generation of microbubbles of each device assuming some reference parameters and possible influences on the bubble diameter. At the end, it was observed that, for rotating porous stone, increased rotation and presence of parallel flow reduce the size of the bubbles generated, but larger than desirable, while “cap with hole” and “Carmin®” generate smaller and smaller microbubbles according to the increase in flow at the cost of increased pressure loss. Finally, the “Carmin®” presented itself as a more efficient device, requiring lower flow to produce microbubbles of diameters of interest and less pronounced pressure drop.

KEYWORDS: Aerators; CFD; microbubbles.

¹ Bolsista do Petróleo Brasileiro S.A. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil. E-mail: marcam@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 4683172564083852.

² Pesquisador no Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: stel.henrique@gmail.com. ID Lattes: 4520319278466515.

³ Docente no Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail mneto@utfpr.edu.br. ID Lattes: 2071333457212415.

⁴ Docente no Departamento de Engenharia Química. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil. E-mail: lmfernandes@utfpr.edu.br. ID Lattes: 6798010423245810.

⁵ Docente no Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: rmorales@utfpr.edu.br. ID Lattes: 5156573817670917.



INTRODUÇÃO

O estudo de mecanismos de geração de bolhas é de interesse a diversos setores industriais onde as mesmas estão presentes, como alimentício, farmacêutico, de mineração e petrolífero. Neste último, as microbolhas são utilizadas em plantas de extração em um processo de flotação para redução do teor de óleo na água produzida, aquela trazida à superfície junto com o petróleo, a partir da sua aderência às pequenas gotas oleosas, e então, este agregado, de menor densidade, tende a subir rapidamente e acumular-se na superfície da mistura, reduzindo a concentração do contaminante no seio do líquido para que este atinja os limites de quantidade de óleo definidos por regulamentações ambientais para o reaproveitamento ou descarte correto e seguro deste efluente (Khuntia, Majumder e Ghosh, 2012).

Para que um processo de flotação seja eficiente, é necessária a geração de bolhas de diâmetro muito diminuto, na casa dos micrômetros. Entretanto, produzi-las representa um grande desafio. Métodos de saturação por pressurização ou eletrólise possuem considerável eficiência, contudo demandam alto gasto energético ou espaço físico, sendo inconvenientes em plataformas petrolíferas *offshore*, enquanto modelos mecânicos e hidráulicos, como impelidores e placas de orifício, também geram bolhas muito pequenas e necessitam de menos energia e espaço, porém, por vezes, não são muito efetivos na geração de microbolhas (Zimmerman *et al.*, 2008).

Sob outra ótica, projetos de equipamentos mais eficientes voltados para flotação exigem um estudo detalhado de propriedades do escoamento, como perda de carga, perfis de velocidade, tensão de cisalhamento e turbulência. A busca por esses dados experimentalmente muitas vezes é dispendiosa e de difícil interpretação. Em resposta a isso, soluções numéricas resolvidas por ferramentas computacionais, como programas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), tornam-se essenciais, pois possibilitam a visualização e obtenção de informações difíceis de se retirar na prática, a partir de simulações de diferentes cenários, escalas e condições operacionais inviáveis experimentalmente.

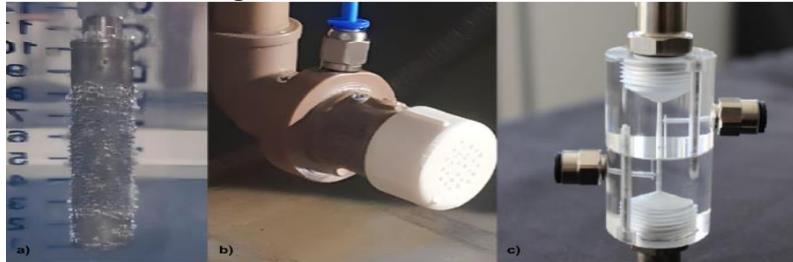
Nesse sentido, o presente trabalho aborda um estudo numérico do escoamento monofásico em dispositivos candidatos para a geração de microbolhas. Por meio do uso do programa comercial de CFD ANSYS® CFX®, pretende-se obter propriedades relevantes do escoamento interno de líquido em mecanismos com potencial para formação de microbolhas, e posterior avaliação desses dados por modelos da literatura para quebra e coalescência de bolhas, com o objetivo de atestar a capacidade desses dispositivos em gerar microbolhas em cenários reais.

GEOMETRIAS DE INTERESSE

Os aeradores estudados foram a pedra porosa rotativa, “*cap com orifício*” e o “*Carmin*®”, apresentados nesta ordem e esquematizados na Figura 1 e Figura 2, respectivamente.



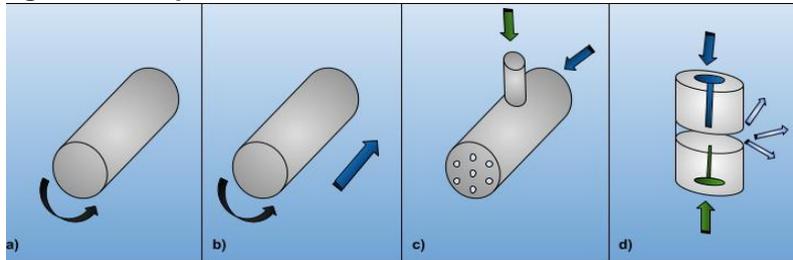
Figura 1 – Aeradores avaliados



a) Pedra porosa rotativa; b) “Cap com orifício”; c) “Carmin®”.

Fonte: Elaborada pelos autores (2023), (c) YLEC Consultants (2023).

Figura 2 – Esquema de funcionamento dos aeradores avaliados



a) Pedra porosa rotativa; b) Pedra porosa rotativa com vazão paralela; c) “Cap com orifício”; d) “Carmin®”.

Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

A pedra porosa rotativa consiste em uma superfície microporosa envolvendo um dispositivo rotacional. Para este caso, o aerador, submerso no fluido de trabalho, foi simulado em duas situações, sem e com vazão de água paralelamente, como mostrado na Figura 2a e 2b, respectivamente.

O próximo aerador simulado foi o chamado “cap com orifício”, esquematizado na Figura 2c. Ele consiste em um tubo onde são direcionados água e gás, e a mistura é forçada a passar por pequenos orifícios localizados na extremidade da tubulação, resultando em um alto cisalhamento sobre o escoamento devido ao estreitamento abrupto do canal e induzindo a geração de bolhas.

Em seguida, simulou-se o “Carmin®”, exposto na Figura 2d, dispositivo criado pela empresa YLEC Consultants, onde água é injetada por um capilar superior e deságua em uma superfície perpendicular forçando o escoamento a realizar uma curva de forma abrupta, o que causa uma região de alto cisalhamento exatamente onde gás é injetado em sentido ascendente por outro capilar, gerando microbolhas e escoando forçadamente pela abertura do dispositivo.

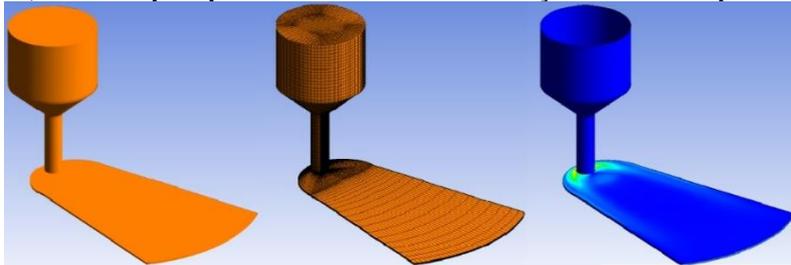
METODOLOGIA

O programa de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) ANSYS® CFX® foi utilizado para solucionar o escoamento monofásico interno de cada dispositivo candidato, assumindo a água como fluido de trabalho. Para tanto, o programa resolve numericamente balanços de massa e quantidade de movimento, assim como um modelo para turbulência do escoamento, que buscam descrever o comportamento do fluido nas regiões de interesse no interior dos aeradores estudados.



Para isso, adotou-se o seguinte fluxo de trabalho: confecção de uma geometria similar do objeto real a ser estudado, muitas vezes utilizando apenas uma região simétrica do dispositivo para economia de esforço computacional; posterior geração de uma malha estruturada sobre a geometria; montagem de setup de simulação com aplicação de condições de contorno; simulação propriamente dita; e o pós-processamento a fim de se obter os dados de interesse e, então, realizar as análises desejadas. Na Figura 3, pode-se observar algumas das etapas mencionadas aplicadas ao dispositivo “Carmin[®]”.

Figura 3 – Geometria, malha e pós-processamento de simulação numérica para o aerador “Carmin[®]”



Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

A etapa de pós-processamento forneceu dados utilizados para análise de perda de carga e propriedades de turbulência, entre elas, a dissipação turbulenta (ϵ), que diferentes literaturas correlacionam com o diâmetro de bolha (de corte). A correlação utilizada neste trabalho foi a de Martínez-Bazán, Montanes e Lancheras (1999), descrita na Eq. (1), que relaciona o diâmetro de corte (D_c) com a tensão superficial do fluido (σ) e sua densidade (ρ).

$$D_c = 1.26(\sigma/\rho)^{3/5} e^{-2/5} \quad (1)$$

Por fim, a fim de selecionar o aerador mais interessante ao propósito do estudo, foram determinados alguns parâmetros desejáveis, tais como vazão nominal de fluido igual a 0,1m³/h, queda de pressão máxima de 5bar e diâmetro mínimo de bolha de 100 μ m.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a aplicação da metodologia explicitada anteriormente, os resultados obtidos foram reunidos e analisados nesta seção. No caso do mecanismo da pedra porosa rotativa, buscou-se analisar a influência da rotação do dispositivo e da presença de vazão de fluido paralelamente.

Com esse propósito, simularam-se casos com o aerador imerso em meio líquido em repouso e em fluido de vazão nominal em diferentes rotações. Empregando-se a correlação mencionada para dissipação turbulenta, encontraram-se os diâmetros teóricos de bolha para cada cenário e apresentados na Tabela 1, onde observa-se uma redução considerável de diâmetro de acordo com o aumento da rotação do mecanismo, o que é melhorado com a injeção de fluido paralelamente. Contudo, observa-se que, para os cenários testados, não foi alcançado um diâmetro de bolha correspondente ao requisito mínimo de projeto de 100 μ m.



XIII Seminário de Extensão e Inovação

XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR

Ciência e Tecnologia na era da Inteligência Artificial: Desdobramentos no Ensino Pesquisa e Extensão
20 a 23 de novembro de 2023 - Campus Ponta Grossa, PR

SEI-SICITE
2023



Tabela 1 - Dados pedra porosa rotativa

Sem vazão		0,1m ³ /h	
rpm	d _{corte} (μm)	rpm	d _{corte} (μm)
200	56277	200	11706
500	15052	500	13767
1000	5238	1000	4905
2000	1826	2000	1765
3600	735	3600	703

Fonte: Elaborada pelos autores (2023)

O aerador “*cap com orifício*” foi simulado com diferentes vazões de líquido, partindo da nominal até 0,7 m³/h, analisando-se sua influência sobre o diâmetro de corte de bolhas e a perda de carga do escoamento. Os resultados dessas simulações mostraram como o aumento da vazão gera um aumento de perda de carga e, ao mesmo tempo, uma redução do tamanho de bolha teórico, como apresentado na Tabela 2. Deste modo, o dispositivo, apesar de gerar microbolhas, impõe certos obstáculos para aplicações práticas, tais como vazão superior à nominal e queda de pressão relativamente alta para atingir seu propósito.

Tabela 2 - Dados “*cap com orifício*”

Vazão (m ³ /h)	d _{corte} (μm)	ΔP (bar)
0,1	236	0,14
0,2	120	0,52
0,3	82	1,16
0,4	61	2,05
0,5	55	3,20
0,6	42	4,60
0,7	38	6,50

Fonte: Elaborada pelos autores (2023)

As simulações do aerador “*Carmin*®” foram realizadas variando-se a vazão de fluido, utilizando-se de valores iguais ou próximos ao nominal, a fim de analisar seu efeito sobre o diâmetro de bolha e a perda de carga. Como ocorreu com o dispositivo anterior, o aumento da vazão provocou uma redução de tamanho de bolha, gerando as microbolhas de interesse, e aumento da perda de carga, como exibido na Tabela 3. Entretanto, este aerador foi capaz de gerar microbolhas ainda menores e com menor queda de pressão para uma mesma vazão quando comparado ao “*cap com orifício*”, apresentando menores desafios práticos para produção de microbolhas nos casos simulados.

Tabela 3 - Dados “*Carmin*®”

Vazão (m ³ /h)	d _{corte} (μm)	ΔP (bar)
0,05	46	0,60
0,10	19	2,24
0,15	11	4,85

Fonte: Elaborada pelos autores (2023)



CONCLUSÃO

Este estudo buscou avaliar a capacidade de diferentes dispositivos em gerar microbolhas com o auxílio do programa de CFD ANSYS® CFX® para resolver numericamente as equações e modelos que descrevem o escoamento interno dos aeradores de interesse. A partir dos dados encontrados nas simulações e correlações da literatura, foi possível relacionar os efeitos de algumas condições de operação sobre diâmetro de bolha gerada e queda de pressão. Para esse fim, foram considerados três dispositivos, pedra porosa rotativa, “cap com orifício” e “Carmin®”, sendo analisadas propriedades do escoamento estipulando-se parâmetros desejáveis de operação, como vazão, queda de pressão e tamanho de bolha.

Ao fim, foi encontrado um comportamento semelhante entre os aeradores estudados, podendo-se concluir que o aumento da vazão em todos eles provoca o aumento de perda de carga e redução do diâmetro de bolha, em diferentes proporções para cada dispositivo. O dispositivo “Carmin®” segue essa tendência, porém gerando bolhas substancialmente menores que os demais dispositivos com queda de pressão mais controlada, representando menores dificuldades práticas para posterior aplicação, sendo considerado como o dispositivo mais eficiente dentro deste trabalho.

Portanto, o estudo alcançou seu objetivo e sua metodologia pode ser estendida para testes em outros aeradores que possuam a mesma mecânica de ruptura de bolhas e, ainda, auxiliar no entendimento de outros fenômenos que não foram abordados. Além disso, a ferramenta numérica foi crucial para desenvolvimento desta análise, exemplificando sua utilidade para solucionar problemas da engenharia, podendo servir como um grande aliado tanto na fase de conceitualização de operações, como para, posteriormente, identificar e entender fenômenos e tendências em cenários difíceis de se estudar por métodos teóricos ou experimentais.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e ao grupo de pesquisa Núcleo de Escoamento Multifásico (NUEM) por todo o suporte e à PETROBRAS pelo suporte financeiro para realização deste trabalho.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

KHUNTIA, S.; MAJUMDER, S. K.; GHOSH, P. Microbubble-aided water and wastewater purification: a review. **Reviews in Chemical Engineering**, v. 28, n. 4-6, p. 191-221, 2012.

MARTÍNEZ-BAZÁN, C.; MONTANES, J. L.; LASHERAS, J. C. On the breakup of an air bubble injected into a fully developed turbulent flow. Part 1. Breakup frequency. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 401, p. 157-182, 1999.

YLEC CONSULTANTS. **Bubbles and microbubbles**. França: YLEC, 2023. Disponível em: <https://www.ylec-consultants.com/en/bubbles-and-microbubbles>. Acesso em: 29 ago. 2023.

ZIMMERMAN, W. B. et al. Microbubble generation. **Recent patents on engineering**, v. 2, n. 1, p. 1-8, 2008.