

INFLUÊNCIA DA FASE SÓLIDA NA FLUIDODINÂMICA DE UMA COLUNA DE BOLHAS COM EXPANSÃO DE DIÂMETRO

K. K. COSTA^{*1}, D. I. SANCHEZ-FORERO, J. L. SILVA JR.², O. P. TARANTO¹, M. MORI¹

¹Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química

²Instituto Federal do Sul de Minas Gerais, Campus Pouso Alegre

*e-mail: karinakc@feq.unicamp.br

RESUMO

Escoamentos multifásicos são amplamente utilizados em diversos setores industriais. Os resíduos pesados de petróleo podem ser hidrocraqueados em reatores trifásicos (gás-líquido-sólido) e a influência da fase sólida no escoamento é de grande importância nesse tipo de processo. O estudo da fluidodinâmica no interior dos equipamentos permite melhorias de projeto e, por consequência, maior eficiência na quebra dos resíduos. Neste trabalho são utilizadas duas técnicas de análise combinadas para avaliar e prever o comportamento fluidodinâmico no interior de uma coluna de bolhas com expansão de diâmetro em casos bifásicos e trifásicos. São elas: Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV) e Fluidodinâmica Computacional (CFD). Experimentalmente, na análise por PIV, foram avaliadas 5 vazões diferentes da fase gasosa com e sem a presença de material particulado e as duas vazões mais elevadas são comparadas com dados numéricos (CFD). Os resultados numéricos e experimentais apresentaram concordância e a presença de sólidos produziu mudanças nos campos e perfis de velocidade em todos os casos.

1 INTRODUÇÃO

Para aumentar a utilização das frações pesadas de petróleo, alguns tratamentos térmicos podem ser empregados. Dentre estes, está o processo de hidrocraqueamento, que consiste na quebra de resíduos provenientes de destilações atmosféricas e a vácuo e vem sendo cada vez mais empregado nas refinarias modernas. Os reatores deste processo podem incluir leitos fixo, fluidizado, de ebulição e leito de lama. Este último consiste em reatores trifásicos (gás-líquido-sólido) onde há presença de óleo a ser processado, hidrogênio pressurizado e partículas sólidas catalíticas. Destacam-se, então, para este estudo as colunas de bolha operando em leito de lama, que possuem a fase sólida agindo como meio catalítico do processo (MOREL et al., 1997).

Uma unidade típica de hidrocraqueamento possui dois estágios. No primeiro estágio 40-50% do volume alimentado é craqueado e os componentes contaminantes de nitrogênio e enxofre são parcialmente hidrogenados. Já no segundo estágio é realizada uma nova quebra do resíduo em frações mais leves (MOHANTY; KUNZRU; SARAF, 1990). Sabendo-se do interesse industrial e das vantagens dos processos de hidrocraqueamento, propõe-se uma nova geometria para aplicação destes.

Dentre as formas de investigar a fluidodinâmica no interior de equipamentos, destacam-se a Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV) e Fluidodinâmica Computacional (CFD). A primeira permite visualizar e quantificar campos de velocidade instantânea em um plano do domínio de escoamento sem interferir no mesmo. Já a segunda consiste em utilizar métodos e

modelagem matemáticos para prever o comportamento do escoamento com o uso de simulações numéricas. A combinação de ambos permite a verificação e validação dos modelos produzindo confiabilidade tanto nos experimentos físicos quanto numéricos.

Neste trabalho faz-se o uso combinado das técnicas numérica (CFD) e experimental (Stereo-PIV) com o objetivo de avaliar a influência da fase sólida em uma coluna de bolhas com geometria diferenciada.

2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Na modelagem matemática, simulações CFD foram realizadas, e baseiam-se no trabalho de Silva Jr et al. (2013), que apresentaram simulações tridimensionais transientes no estudo da hidrodinâmica de colunas de bolhas trifásicas em leito de lama, com concentrações intermediária e alta de sólido.

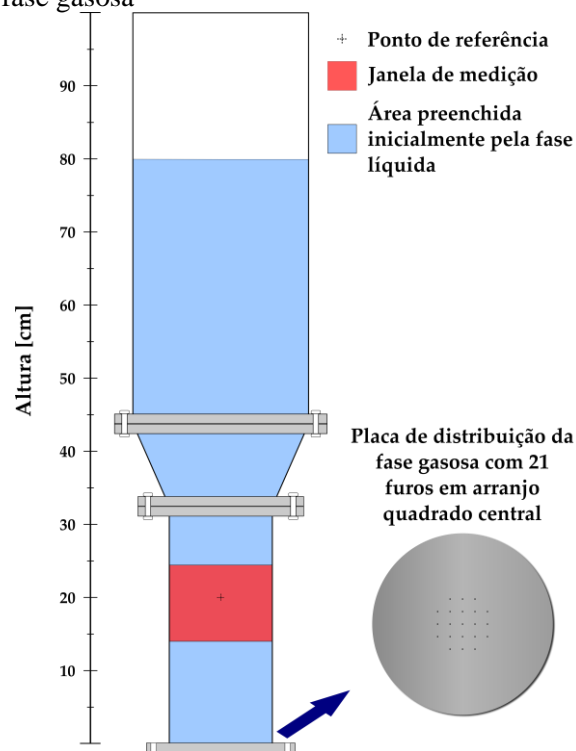
A abordagem Euleriana multi-fluido foi usada, e o modelo de turbulência RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) de duas-equações RNG k- ϵ foi empregado na resolução da turbulência. As interações disperso-contínua (gás-líquido e sólido-líquido) devido ao arraste entre as fases foram consideradas pelas correlações: de Ishii e Zuber (1979) para o arraste entre as bolhas de gás e o líquido, a qual considera possíveis deformações das bolhas; de Wen e Yu (1966) modificado por Jia, et al. (2007), para a interação entre o sólido particulado e a fase contínua líquida, considerando possíveis formações de regiões mais concentradas de partículas sólidas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No procedimento experimental, fez-se o uso de uma coluna de bolhas com expansão de diâmetro construída em acrílico, sendo o diâmetro inferior de 14,5 cm e o superior 24,5 cm e altura de 100 cm, preenchida

inicialmente por 80 cm de água a 22 °C (Figura 1). Como fase gasosa foi utilizado ar adentrando na coluna pela parte inferior, passando por uma placa distribuidora com 21 furos organizados em um arranjo quadrado central (Figura 1) e sua vazão foi variada entre 1.5 e 10 l/min. Foi adicionada também na segunda etapa dos experimentos a fase sólida, que consiste em 20 g de catalisador para FCC com diâmetro na faixa de 100-125 μm .

Figura 1 – Coluna de bolhas com expansão de diâmetro, área de medição e distribuidor da fase gasosa



Fonte: Autor (2015).

O sistema PIV utilizado relaciona pares de imagens retiradas com câmeras de alta resolução sincronizadas com uma luz laser Nd:YAG, posicionada a 90° da folha de luz, de modo que o plano do objeto em foco coincida com a fatia iluminada do escoamento. A técnica foi estendida para uma variação denominada Stereo-PIV com o uso de duas câmeras que registram o

movimento do fluido de diferentes direções de visualização, permitindo a estimativa do terceiro componente de velocidade (WILLERT, 1997).

Como material traçador utilizou-se Rodamina B, com diâmetro de 20-50 μm , $\lambda = 620 \text{ nm}$, $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$ e número máximo de Stokes de 2×10^{-5} , que permite afirmar que as partículas possuem comportamento próximo ao do fluido. O ponto central da região de medição encontra-se a 20 cm do distribuidor de gás da coluna (Figura 1). Foram gravadas 4000 imagens para cada experimento, equivalente a cerca de 10 minutos de tempo real, com uma frequência de gravação de 4,92 Hz. O posicionamento das câmeras foi em frente ao plano de luz laser com um ângulo de 60° entre elas, na mesma linha horizontal.

O pacote da Ansys CFX 14.0 foi usado em todas as etapas da análise numérica. Esquemas de alta ordem foram utilizados na discretização das equações de transporte. Como condições iniciais das simulações empregou-se leito de lama (líquido + sólido) com altura inicial de 80 cm, com fração de sólido de $4,2 \times 10^{-4}$. Para as condições de contorno empregou-se: entrada de gás normal aos furos entrada, com velocidade definida para se obter a vazão desejada; não-deslizamento para as fases gás e líquida, deslizamento livre para a fase sólida particulada nas superfícies sólidas (paredes); saída aberta com pressão relativa igual a zero. Para a análise numérica 100s foram simulados, sendo os primeiros 30s para estabilização do escoamento no sistema, os quais foram desconsiderados na obtenção dos resultados médios.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

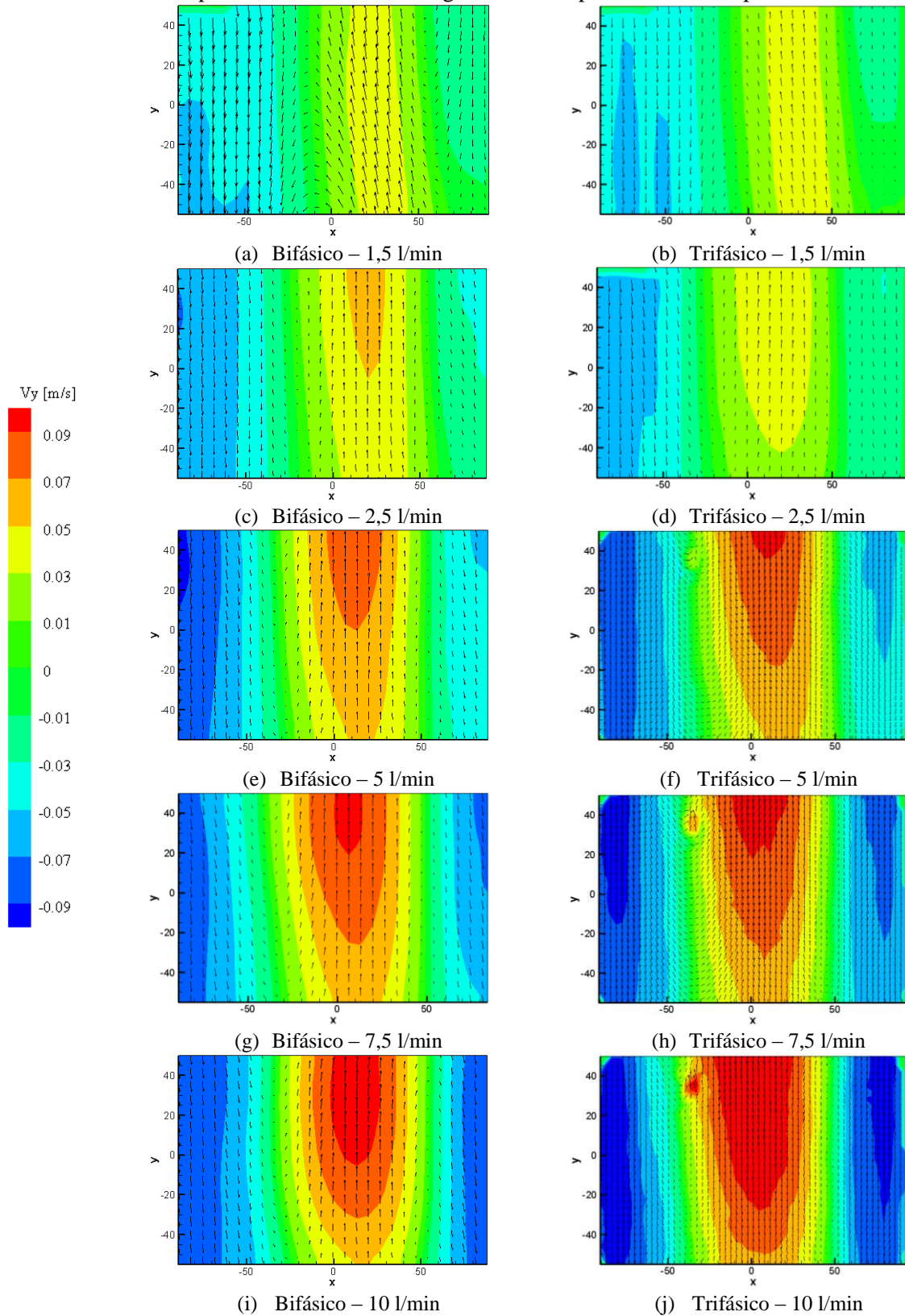
Para avaliar a influência da fase sólida e da vazão da fase gasosa no interior do equipamento, são traçados campos (Figura 2) e perfis de velocidade (Figura 3) da fase contínua. Na Figura 2 é possível observar que

há influência das partículas de catalisador para FCC em todos os casos. No geral, o pico de velocidade máxima no centro da coluna é maior quando o material particulado é adicionado. Isto ocorre pela presença deste próximo às paredes da coluna, região onde há menor velocidade da fase gasosa. A concentração de sólidos na região anular de menor velocidade permite a passagem das bolhas pelo centro da coluna com maior facilidade.

A influência do aumento da vazão de gás pode ser percebida pela mudança nos campos de velocidade da fase líquida apresentados também na Figura 2. Enquanto nos primeiros casos (a-d), com poucas bolhas e vazões de 1,5 e 2,5 l/min a velocidade máxima fica em torno de 0,05 m/s, nos casos onde há maior concentração de gás (e-j), a velocidade alcança velocidades de 0,09 m/s. Isto é esperado pois em todos os experimentos foi utilizado um distribuidor de 21 furos como entrada de ar, tendo por consequência um aumento na velocidade conforme a vazão foi aumentada.

A Figura 3 apresenta uma comparação dos perfis de velocidade em $H=20 \text{ cm}$ obtidos por simulações numéricas e pela técnica PIV nas vazões de gás em 5 e 10 l/min. Estudos anteriores de Costa et al. (2015) apresentaram grande assimetria do perfil para vazões baixas de gás (1.5 l/min). Ao aumentar a vazão de gás, pode-se observar que o deslocamento do perfil para a direita diminui. No caso b, quando a velocidade das fases é maior, o perfil tende a possuir máxima velocidade no raio próximo a zero, diferente do caso a, onde a máxima encontra-se próxima a 20 cm. A região de medição é próxima a entrada da fase gasosa, o que influencia no desenvolvimento do fluxo de ar, juntamente com a vazão de ar. Com o escoamento desenvolvido, como em regiões mais elevadas da coluna, ou com altas vazões, além de velocidades maiores, é possível encontrar um perfil com máxima na região central do raio, ou, $x=0 \text{ cm}$.

Figura 2 – Campos de velocidade (V_y) para a fase líquida nos casos bifásicos e trifásicos na altura $H=15 - 25$ cm do distribuidor para diferentes vazões de gás obtidos experimentalmente por PIV

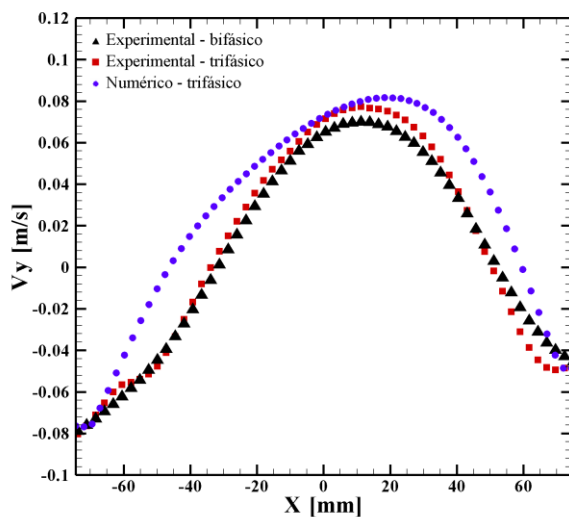


Comparando os resultados obtidos nas simulações numéricas com os experimentais, observa-se que para ambas as vazões, 5 e 10 l/min, o modelo conseguiu prever bem o comportamento fluidodinâmico da coluna, mesmo em uma região onde o escoamento não deve estar plenamente desenvolvido.

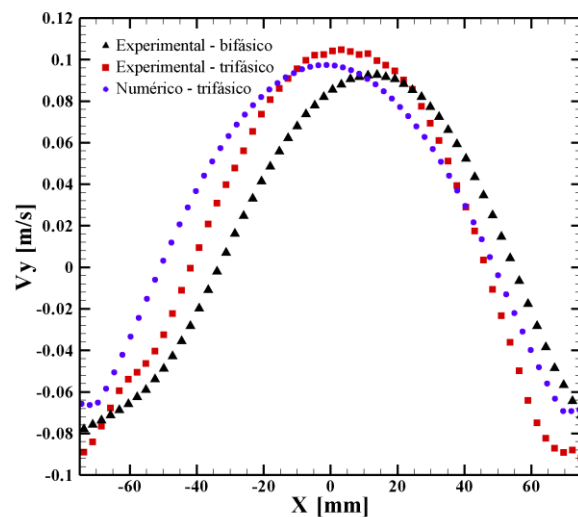
Para a vazão de 5 l/min (Figura 3 (a)), o resultado numérico apresentou assimetria no

perfil de velocidade axial da fase líquida, acompanhando a tendência dos resultados experimentais. No caso da vazão de 10 l/min (Figura 3 (b)), um perfil mais simétrico foi obtido na simulação, fato que pode ser atribuído a maior velocidade de alimentação da fase gasosa, concordando também com o comportamento observado experimentalmente.

Figura 3 – Perfis de velocidade da velocidade da fase líquida, retirados na altura Y=20 cm numérica e experimentalmente, para as vazões de gás fixas em: (a) 5 e (b) 10 l/min



(a) Vazão da fase gasosa = 5 l/min



(b) Vazão da fase gasosa = 10 l/min

5 CONCLUSÕES

Os experimentos realizados numérica e experimentalmente apresentaram boa concordância qualitativa e quantitativa. A presença do material particulado produziu mudanças nos campos e perfis de velocidade em todos os casos. O deslocamento do perfil de velocidade para a direita indica que a região de estudo não apresenta escoamento totalmente desenvolvido nos casos das vazões avaliadas. A fase sólida tende a permanecer próxima às paredes da coluna de bolhas, facilitando a passagem das bolhas pela região central e aumentando a velocidade nesta região.

NOMENCLATURA

λ – comprimento de onda;

ρ – massa específica;

V_y – velocidade na direção Y da fase líquida (água).

REFERÊNCIAS

COSTA, K. K., SANCHEZ-FORERO, D. I., AMARAL, R. L., TARANTO, O. P., MORI, M. Effect of Solid Phase and Geometry on Liquid Velocity of Three-Phase Bubble Columns. **Chemical Engineering Transactions**, v 43, p. 1651-1656, 2015

ISHII, M.; ZUBER, N. Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows. **AIChE Journal**, v.25, p.843-855, 1979.

JIA, X; WEN, J.; FENG, W.; YUAN, Q. Local Hydrodynamics Modeling of a Gas-Liquid-Solid Three-Phase Airlift Loop Reactor. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v.46, p.5210-5220, 2007.

MOHANTY, S.; KUNZRU, D.; SARAF, D. N.. Hydrocracking: a review. **Fuel**, v. 69, p.1467-1473, 1990.

MOREL F., KRESSMANN S., HARLE V., KASZTELAN S. Processes and Catalysts for Hydrocracking of Heavy Oil and Residues. **Studies in Surface Science and Catalysis**, v.106, p.1–16, 1997.

SILVA JR, J. L., MORI, E. D., SOCCOL JR, R., D'ÁVILA, M. A., MORI, M. Interphase Momentum Study in a Slurry Bubble Column. **Chemical Engineering Transactions**, v 32, p 1507-1512, 2013.

WEN, C.Y.; YU, Y.H. Mechanics of Fluidization. **Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.**, v.62, p. 100-111, 1966.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Petróleo Brasileiro (PETROBRAS) pelo apoio financeiro que permitiu a realização deste trabalho.