

ENCIT-2018-XXXX

NUMERICAL SIMULATION OF THE PHENOMENON PEN OF BUBBLES

Fernanda Kelly de Jesus Gomes

Marcelo de Oliveira e Silva

Universidade Federal do Para, Rua Augusto Correa, 1 - Guama, Belem - PA, 66075-110

fernanda.kelly@hotmail.com, mos@ufpa.br

Luiz Ricardo Braga Pereira

Universidade Federal do Para, Rua Augusto Correa, 1 - Guama, Belem - PA, 66075-110

e-mail

Abstract. *Este trabalho apresenta simulacoes numericas preliminares do fenomeno pluma de bolhas. O tratamento numerico esta sendo desenvolvido com o software de codigo livre OpenFOAM, fundamentado no metodo dos volumes finitos para discretizacao do espaco fisico e temporal. Utiliza-se a abordagem Euleriana-Euleriana para escoamentos multifasicos incompressiveis ja implementada no software atraves do solver twoPhaseEulerFoam desenvolvido por Rusche (2003) para simular escoamentos dispersos, cujos termos de troca de quantidade de movimento entre as fases (arrasto, sustentacao e massa virtual) estao inclusos em sua modelagem. O fenomeno e reproduzido numericamente adotando-se as mesmas caracteristicas experimentais de pesquisas realizadas pelo PPGEM. Na intencao de validar o codigo, perfis numericos de fracao de vazio e velocidade vertical da fase gasosa para tres alturas sao comparados com dados experimentais obtidos no PPGEM. Os comportamentos experimentais dos perfis de fracao de vazio e velocidade do gas foram de certa forma capturados pelo tratamento numerico do solver twoPhaseEulerFoam mediante algumas calibracoes feitas no modelo. Contudo, um melhor entendimento da fisica do problema e do software OpenFOAM sao necessarios para obtencao de resultados mais satisfatorios.*

Keywords: *Pluma de Bolhas, Escoamento multifasico, OpenFOAM.*

1. INTRODUCTION

Se um fluxo continuo de gas e liberado no interior de um meio liquido, o gas toma a configuracao de bolhas (devido as instabilidades de Kelvin- Helmholtz) e movimenta-se ascendentemente por conta do empuxo provocado pela diferenca de densidade entre as fases. A regio bifasica e semelhante a um cone com base na superficie livre, vertice no orificio de entrada e altura H. Em virtude do arrasto superficial das bolhas, o gas transporta consigo apreciavel quantidade de liquido, fenomeno conhecido como "entranhamento". Por razoes de continuidade, o movimento da fase dispersa suscita no liquido uma regio de recirculacao igualmente ascendente (Barbosa, 1997). O fenomeno descrito e conhecido como pluma de bolhas pode ser observado na Fig.1.

O escoamento em pluma de bolhas e considerado axissimetrico para fontes de gas puntiformes e tem sido dividido categoricamente em tres regioes distintas: na Regiao de Escoamento em Desenvolvimento (Zone of Flow Establishment - ZOFÉ), na Regiao de Escoamento Desenvolvido (Zone of Established Flow - ZOEF) e na Regiao de Superficie Livre (Zone of Surface Flow - ZOSF). Tais partes sao determinadas pelo balanço das forcas que dominam cada regio da pluma. A seguir, apresentam-se teorias que consideram o escoamento em plumas de bolhas sob regime permanente, isotermico, totalmente turbulento, supondo-se o meio nao estratificado e admitindo-se a inexistencia de correntes cruzadas (Barbosa, 1997).

Na Regiao de Escoamento em Desenvolvimento, proxima ao orificio de entrada do gas, as forcas de inercia e empuxo tem mesma ordem de grandeza e a pluma de bolhas ainda apresenta caracteristicas de jato (a maioria das pesquisas desenvolvidas em plumas de bolhas desconsideram analises de fenomenos nessa regio). A forca motriz do escoamento na Regiao de Escoamento Desenvolvido e o empuxo, que domina as forcas de inercia a partir de uma determinada regio (fronteira entre ZOFÉ e ZOEF) definida como a localizacao onde as bolhas alcancam sua velocidade terminal. Na ZOSF, as forcas devido as tensoes superficiais interferem no escoamento e causam a deflexao da pluma e a formacao de ondas na superficie (Barbosa, 1997).

A comunidade cientifica tem pesquisado com afinco as caracteristicas da dinamica do escoamento em pluma de bolhas e diversos estudos que abordam o tema podem ser encontrados na literatura. Igualmente vastas sao as aplicacoes do fenomeno na industria para analisar processos de aeracao, destilacao, reacoes quimicas, ou com a finalidade de controlar

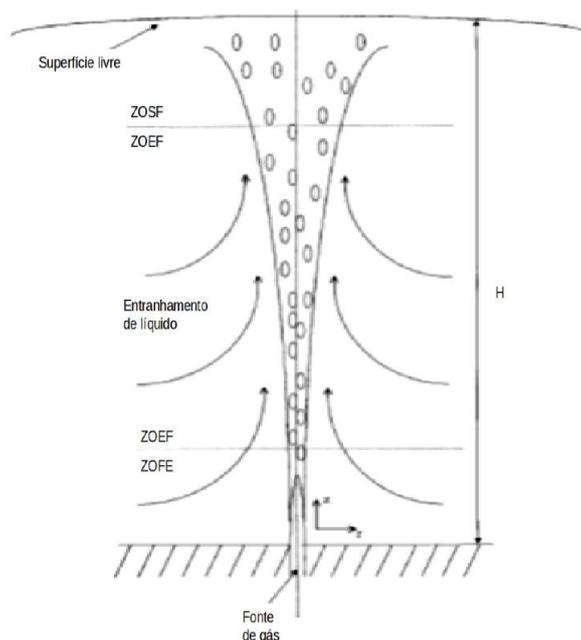


Figure 1. Ilustracao de uma pluma de bolhas.

eventuais vazamentos de gas ou oleo em perfuracoes ou operacoes de poucos submarinos. Neste ultimo exemplo, a pluma de bolhas formada pode gerar ondas quando chegar a superficie e danificar plataformas de petroleo e impedir a aproximacao de navios de resgate para controlar o vazamento. Alem disso, ao redor da pluma pode se formar uma corrente marinha capaz de homogeneizar a temperatura e quebrar o equilibrio ecologico marinho ao misturar as aguas da superficie com as do fundo (Conti, 1983; Barbosa, 1997; Rusche, 2003; Rezende *et al.*, 2014; Paula *et al.*, 2015).

Muito embora a construcao de equipamentos capazes de reproduzir o fenomeno sejam de simples concepcao e facil manutencao, a complexidade dos padroes do escoamento e a flutuacao periodica da pluma de bolhas, por exemplo, ainda dificultam bastante a descricao multifasica do fenomeno (Silva, 2008; Dionisio *et al.*, 2007). Como alternativa, a ferramenta numerica tem se tornado essencial a investigacao de muitos aspectos criticos para os quais a experimentacao fisica nao e possivel, de forma a permitir que o tratamento numerico seja o procedimento mais pratico e, em muitos casos, o unico disponivel para obtencao de dados (Maliska, 2004; Fortuna, 2000).

2. METODOLOGIA

O estudo de um fenomeno fisico qualquer deve ter como base analises teoricas previas. Logo, torna-se fundamental o conhecimento das etapas de solucao numerica de um projeto CFD (Computational Fluid Dynamics). A solucao numerica deve iniciar com a modelagem fisica do problema, onde sao estabelecidas as grandezas fisicas relevantes ao sistema e a maneira como as grandezas afetam o proprio sistema. Principios fisicos norteiam a elaboracao dos modelos a partir de leis de conservacao de massa, quantidade de movimento e energia. Como resultado, os modelos sao expressos por meio de equacoes no dominio temporal e espacial relacionando as grandezas relevantes entre si (Maliska, 2004; Fortuna, 2000).

O proximo passo consiste em tratar de forma adequada o modelo computacionalmente, estabelecendo criteriosamente as equacoes e a regioao continua de validade do modelo. A regioao continua e entao dividida em um numero de pontos. Nesses pontos as solucoes das equacoes sao obtidas. O conjunto dos pontos discretos e conhecido como malha. A construcao da malha e de importancia vital a obtencao de uma solucao numerica representativa do fenomeno (Maliska, 2004; Fortuna, 2000).

Em seguida, os termos das equacoes sao escritos em funcao dos valores das incognitas em pontos discretos adjacentes e equacoes algebricas lineares sao obtidas. Condicoes iniciais e de fronteira, propriedades fisicas do fluido e parametros especificos do escoamento sao introduzidos nessa etapa. As equacoes algebricas sao resolvidas e a solucao do problema pode ser analisada. Entao, tecnicas de visualizacao sao aplicadas e tem papel fundamental na comparacao entre resultados numericos e experimentais, uma vez que o modelo pode ser ajustado ate que represente de maneira adequada a fisica do problema (Maliska, 2004; Fortuna, 2000). Na Figura 2 sao mostradas as etapas de solucao numerica de um fenomeno fisico qualquer.

A simulacao numerica da pluma de bolhas foi realizada em um cluster de 32 nucleos de processamento, que pertence a Faculdade de Engenharia Mecanica da UFPA, onde a versao 2.3.8 do software de codigo livre OpenFOAM encontra-se instalada. O estudo numerico do fenomeno adota as caracteristicas experimentais de pesquisas realizadas pelo PPGEM, tais como: informacoes geometricas do tanque de agua e do injetor de ar, vazao de ar no meio liquido e altura da quantidade

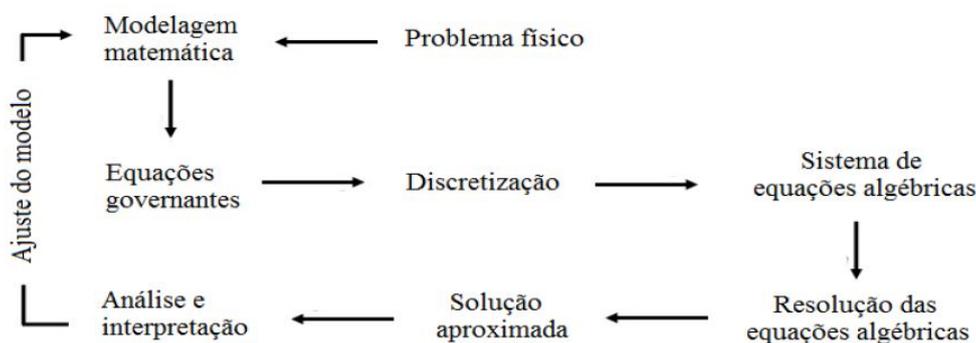


Figure 2. Síntese das etapas de uma solução numérica de um fenômeno físico qualquer.

de líquido no interior do tanque.

A metodologia numérica do OpenFOAM é baseada no método dos volumes finitos para discretização do espaço físico e temporal (Rusche, 2003). Essencialmente, esta técnica consiste em integrar as equações diferenciais parciais de variáveis contínuas sobre um volume de controle e em um intervalo de tempo para obter um sistema de equações algébricas correspondente. O método de volumes finitos é largamente empregado na literatura de CFD (Maliska, 2004; Fortuna, 2000).

3. RESULTADOS

As características experimentais deste estudo foram obtidas em um tanque com dimensões de 0.5 m de comprimento, 0.5 m de largura e 0.6 m de altura. O nível de água no tanque compreendia 0.5 m de altura. Inseriu-se um fluxo contínuo de ar no meio líquido através de um injetor móvel de 1 mm de diâmetro por 30 mm de altura localizado na base do tanque. As vazões de gás correspondiam aos valores de 1, 8 e 3 l/minuto. Dados experimentais de fração de vazio e velocidade vertical da fase gasosa foram medidos nas alturas de 13 cm, 18 cm e 32,7 cm acima da base do tanque. Uma representação da geometria do tanque, do nível de água e das alturas de medições são mostradas na Fig. 3.

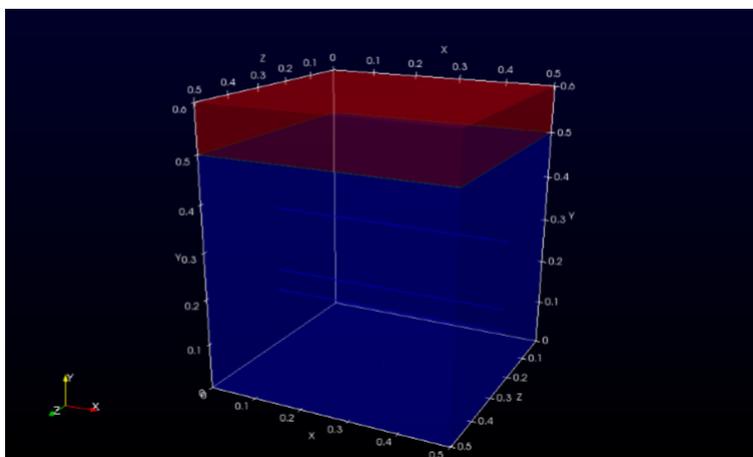


Figure 3. Representação do tanque de água. A cor azul determina a altura do nível de água. As linhas azuis informam as localizações das medições dos parâmetros de fração de vazio e velocidade vertical da fase gasosa. O injetor não é representado na figura.

O domínio computacional foi discretizado para os refinamentos apresentados na Tab. 1. As malhas são do tipo estruturadas, com refinamento em direção à entrada do injetor, como pode ser observado nas Fig. 4 e Fig.5. Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos com a malha de 75x75x75 elementos.

Adotaram-se as condições iniciais padrão do solver para a maioria das variáveis, com exceção das condições iniciais de temperatura do líquido e do gás definidas como `internalField` uniforme a 20°C e das variáveis turbulentas definidas com o valor inicial de $10^{-8}\text{m}^2\text{s}^{-3}$. Os valores de temperatura fazem referência à temperatura local de ocorrência das medições experimentais. Conforme Martin (2013), efeitos turbulentos iniciais são desprezados quando valores ínfimos para as variáveis turbulentas são determinados.

As condições de contorno para as variáveis nas fronteiras do domínio são descritas no OpenFOAM pela instrução `boundaryField`. Um procedimento semelhante ao anterior foi adotado, ou seja, utilizou-se as condições de contorno já

Table 1. Divisões do domínio computacional.

Number of divisions	Cells	Points
25 x 25 x 30	15625	17576
49 x 49 x 50	120050	127500
75 x 75 x 75	421875	438976

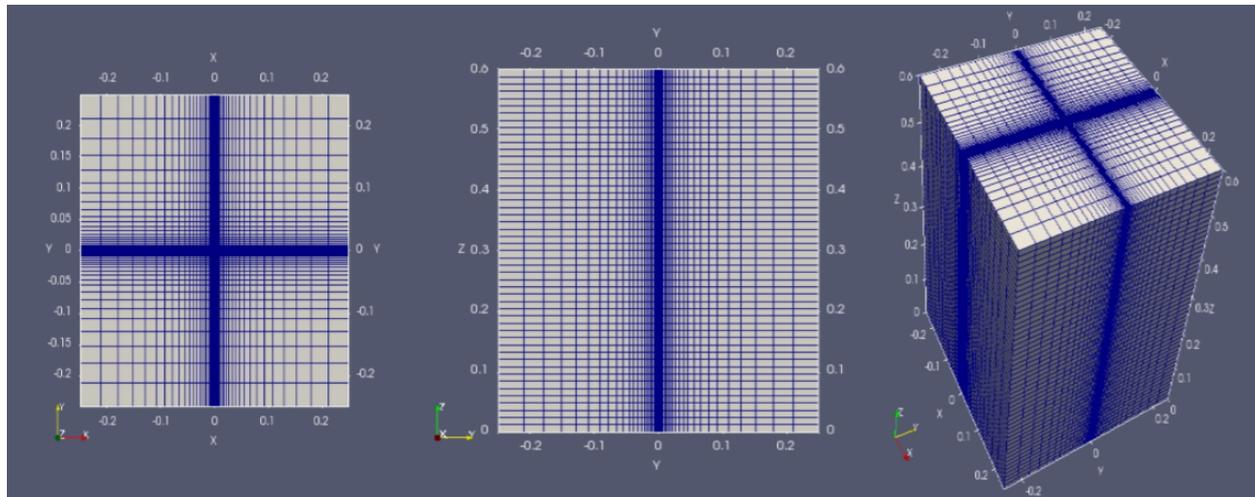


Figure 4. Vistas superior, lateral e panorâmica, respectivamente, da malha de 49 x 49 x 50 divisões.

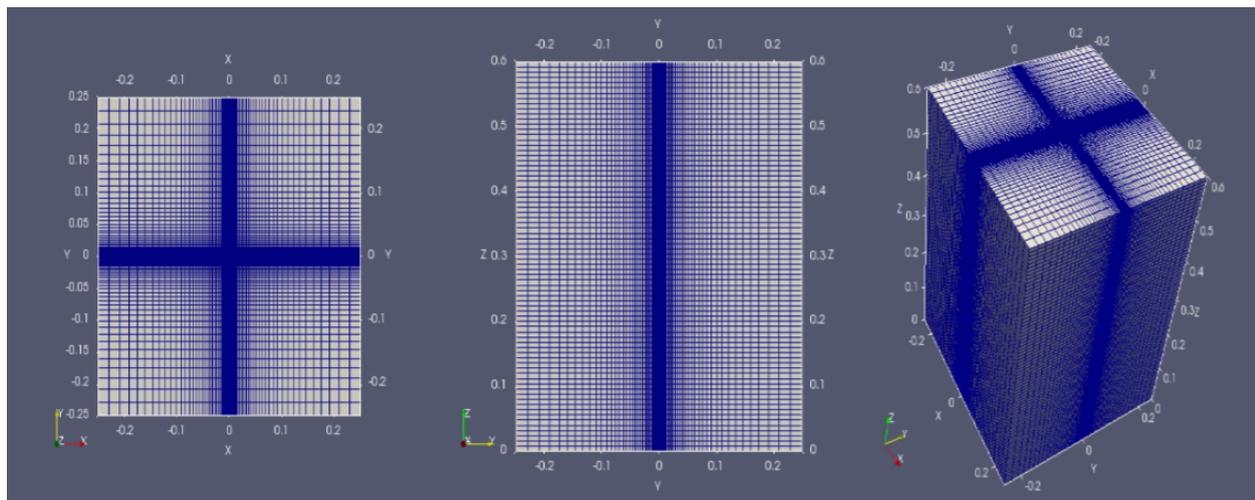


Figure 5. Vistas superior, lateral e panorâmica, respectivamente, da malha de 75 x 75 x 75 divisões.

implementadas no solver para a grande maioria das variáveis, exceto para a vazão do gás, fração de vazio e variáveis turbulentas que foram ajustadas na entrada do domínio. A vazão de gás na entrada do domínio corresponde aos valores experimentais. 100% de ar deveria ser injetado na entrada do domínio pela determinação inlet 1 como feito por Martin (2013), porém somente ajustes abaixo de 50% obtiveram soluções numéricas concordantes com os dados experimentais.

Perfis numéricos e experimentais de fração de vazio e velocidade vertical da fase gasosa obtidos na região central do domínio são comparados com os dados experimentais nas três alturas de medições.

Na Figura 6 são mostrados os perfis numéricos de fração de vazio em comparação com os experimentais. Qualitativamente, vemos que as curvas dos gráficos experimentais mostram comportamentos semelhantes, mesmo para diferentes alturas de medições, onde verificamos picos na região central acima do injetor diminuindo de intensidade com a altura. Comportamentos parecidos são reproduzidos pelas curvas dos gráficos numéricos, onde os mesmos exibem os picos centrais de fração de vazio diminuindo de intensidade à medida que a distância da base do domínio aumenta.

Ve-se na Figura 6a o pico numérico apresentar valores abaixo do experimental. Acontece o inverso na Fig. 6c. Em contrapartida, na Figura 6b os picos numéricos e experimentais mostram boa concordância. Entretanto, vemos que a grande maioria dos dados experimentais são superestimados pelos perfis numéricos à medida que se afastam da região central de medições.

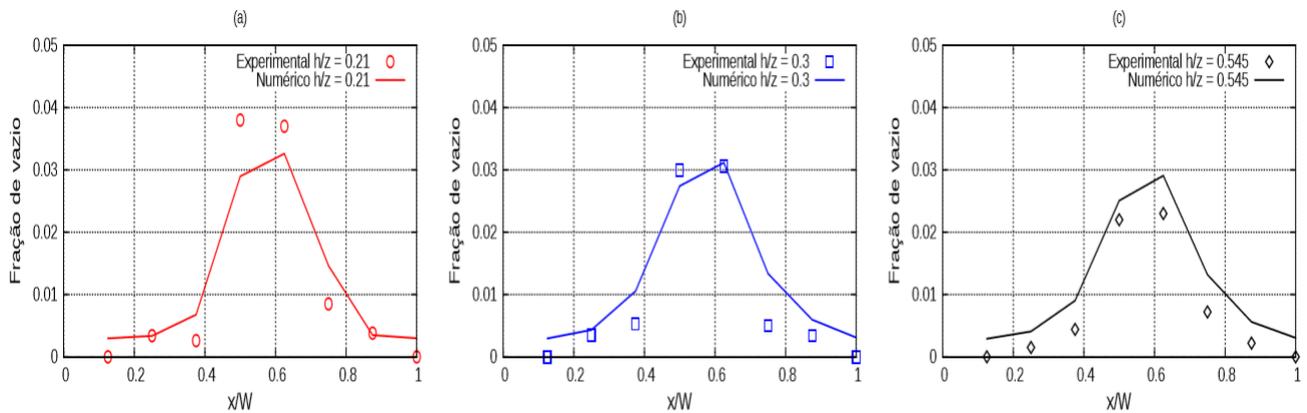


Figure 6. Perfis experimentais e numericos de fracao de vazio.

Na Figura 7 são mostrados os perfis numericos de velocidade vertical da fase gasosa em comparacao com os experimentais. Qualitativamente, observamos que os perfis experimentais mostram uma diminuicao dos maiores valores de velocidade do gas com a altura. Verificamos ainda que essa regio de maior velocidade do gas esta deslocada um pouco a direita da regio central. A caracteristica da diminuicao dos perfis com a altura sao bem representadas pelos perfis numericos, porem estes desenvolvem picos mais protuberantes e centralizados.

Na Figura 7a, notamos a maior disparidade entre os perfis, onde boa parte das medicoes sao subestimadas pelo tratamento numerico. Na Figura 7b, verificamos que o perfil experimental torna-se um pouco mais plano, o que pode ser identificado no perfil numerico a mesma altura, mas que ainda e subestimado pelo tratamento numerico. Verificamos que os dados experimentais apresentam um formato aproximadamente parabolico na Fig. 7c, essa caracteristica e pouco apresentada pelo perfil numerico, mas nessa altura de medidas acontecem as melhores concordancias entre dados experimentais e numericos. Nas regioes mais afastadas da regio central prevalecem superestimativas dos perfis numericos para com os dados experimentais.

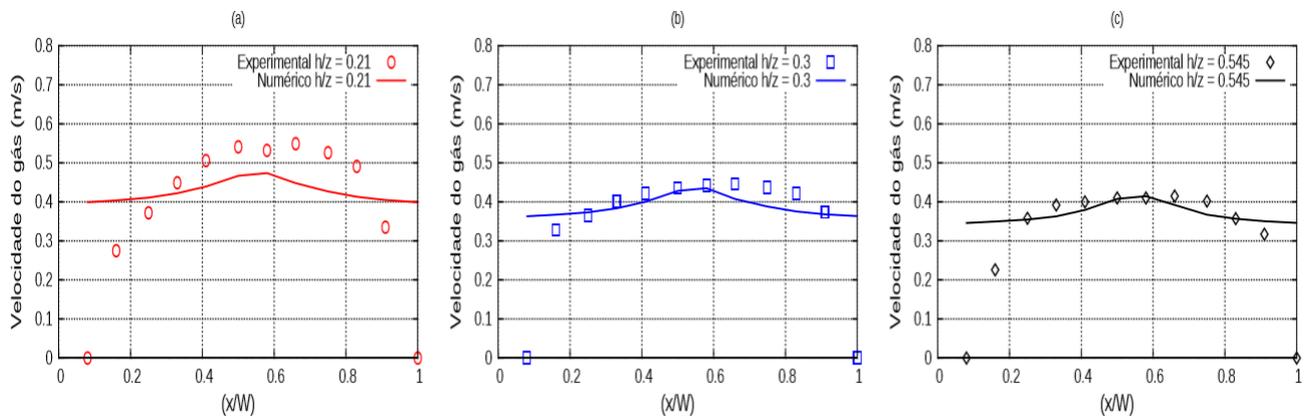


Figure 7. Perfis experimentais e numericos de velocidade.

4. CONCLUSAO

Neste trabalho de simulacao numerica do fenomeno pluma de bolhas, os resultados preliminares dos perfis numericos em comparacao com os experimentais mostraram que muito ha o que ser averiguado a cerca da fisica do problema e sobre o software OpenFOAM para melhor representacao das caracteristicas medias deste complexo escoamento multifasico. Todavia, os comportamentos experimentais dos perfis de fracao de vazio e velocidade vertical da fase gasosa foram de certo modo capturados pelo tratamento numerico do solver twoPhaseEulerFoam mediante algumas calibracoes feitas no modelo. Como complemento do trabalho, ve-se a possibilidade de simular numericamente a pluma de bolhas nas proximidades das fronteiras do dominio para observacao do efeito coanda.

5. REFERENCES

Barbosa, J.R., 1997. *O método dos seniores eletro-resistivos aplicado à pluma de bolhas*. Ph.D. thesis, Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 112p.

- Conti, T.N., 1983. *Simulação numérica de escoamento bifásico adiabático, bidimensional, em regime transiente, aplicando o modelo de dois fluidos*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Dionisio, R.P. *et al.*, 2007. “Simulação tridimensional de uma coluna de bolhas-diferentes abordagens geométricas e modelagem”.
- Fortuna, A.O., 2000. *Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações*. Edusp.
- Maliska, C.R., 2004. “Computational fluid mechanics and heat transfer”. *LTC, Rio de Janeiro, Brazil*.
- Martin, S., 2013. *CFD study of gas-liquid flow from a subsea gas release*. Master’s thesis, University of Stavanger, Norway.
- Paula, D.M.L., Valls, E.M.L., Siqueira, A.M.O. and Batet, L., 2015. “Validação do código numérico openfoam para modelos de fluxo bifásico gás-líquido”. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, Vol. 1, No. 2, pp. 6369–6376.
- Rezende, R.V.P. *et al.*, 2014. “Modelo de fechamento para o tensor de interface no modelo de dois fluidos: modelagem matemática e simulação numérica”.
- Rusche, H., 2003. *Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions*. Ph.D. thesis, Imperial College London (University of London).
- Silva, L.F.L.R., 2008. “Desenvolvimento de metodologias para simulação de escoamentos polidispersos usando código livre”. *Doutorado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro*.

6. RESPONSIBILITY NOTICE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluído neste trabalho.