

# ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA EM UM LEITO DE JORRO BIDIMENSIONAL COM ALIMENTAÇÃO NÃO CONVENCIONAL

R. SCATENA, M.F. FALEIROS, B.C. SILVA, C.R. DUARTE e M.A.S. BARROZO

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química

e-mail: rafascatena@gmail.com

**RESUMO** – Desde sua descoberta em 1955, o leito de jorro cônico-cilíndrico tem encontrado diversas aplicações em virtude do eficiente contato fluido-partícula e das altas taxas de transferência de massa e calor. Porém, esse equipamento encontra sérias restrições de *scale-up*, o que torna impraticável certas aplicações industriais. Uma alternativa para evitar a instabilidade do leito é o uso de uma configuração bi-dimensional com uma alimentação de ar não convencional. O objetivo desse estudo foi reproduzir através de simulação via *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*) o escoamento no interior de um leito de jorro bidimensional não convencional. A abordagem Euler-Euler, que trata ambas as fases gás-sólido como contínuas, foi empregada. Os resultados experimentais de fração de sólidos foram comparados, sob as mesmas condições, com os resultados de simulação. As simulações mostraram uma boa capacidade de previsão da dinâmica das partículas no interior do leito.

## 1. INTRODUÇÃO

Desenvolvido inicialmente por Mathur e Gishler (1955), o leito de jorro mostrou-se muito eficaz para processos de contato entre gás e partículas. O emprego de leitos de jorro para unidades de resfriamento de sólidos, granulação, revestimento de sólidos, cristalização, etc., é comumente encontrado, no entanto tal técnica raramente é aplicada em processos industriais devido a dificuldades de *scale-up*. De acordo com Dogan *et al.* (2000), leitos com mais de 300 mm de diâmetro já apresentam dificuldades em manter uma performance contínua.

Para superar tal obstáculo, modificações foram propostas por Mujumdar (1984) a fim de facilitar o *scale-up* desse equipamento. A ideia foi construir um leito de jorro bidimensional, que logo após foi chamado de leito de jorro retangular por Dogan *et al.* (2000). Sua estrutura simples e de fácil construção trouxe grande flexibilidade aos estudos dos diferentes regimes causados pelas variações dos parâmetros de projeto, como por exemplo: ângulo da base, dimensões da entrada de ar, base e coluna, velocidade do ar, densidade, diâmetro das partículas, dentre outras.

A fluidodinâmica computacional (*CFD*) contribuiu bastante no que diz respeito à previsão de comportamentos de escoamentos de sistemas multifásico em leitos de jorro. Conforme estudos apresentados na literatura (Duarte *et al.*, 2009; Du *et al.*, 2006; Lu *et al.*, 2001, 2004; Taghipour *et al.*, 2003; Kawaguchi *et al.*, 2000; Konduri *et al.*, 1999; Krzywanski *et al.*, 1992). Duarte *et al.* (2008) e

Wei *et al.* (2006), mostraram que é possível descrever a fluidodinâmica das partículas e do gás no interior de leitos de jorro utilizando uma Modelagem Euleriana Granular Multifásica implementada no pacote computacional Ansys FLUENT® 14.0.

A pesquisa desenvolvida neste trabalho teve como objetivo estudar, através de simulações via *CFD*, o escoamento no interior de um leito de jorro bidimensional. Para isso, diferentes parâmetros como velocidade de entrada do ar e altura do leito estático foram simulados e comparados com resultados experimentais obtidos por Chen (2008). Ferramentas como essas geram perspectivas positivas acerca do desenvolvimento de possíveis geometrias e condições perfeitas para leitos de jorro em maiores escalas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo foi empregado um leito de jorro do tipo bidimensional, cujo material constituinte é polimetil-metacrilato (plástico acrílico), com dimensões iguais às estudadas por Chen (2008), conforme descritas na Figura 1. Na qual:  $a = 300$  mm;  $h = 173,2$  mm;  $b = 100$  mm;  $y = 60^\circ$ ;  $H_c = 1000$  mm;  $x = 100 \times 4$  mm.

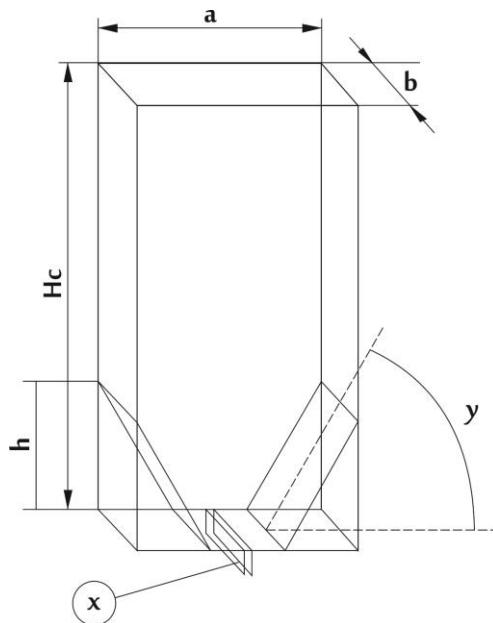


Figura 1 – Dimensões do leito empregado no estudo.

As partículas utilizadas neste projeto foram esferas de vidro, cujo diâmetro médio ( $d_p$ ) = 1.33 mm, esfericidade ( $\phi_s$ ) = 1.0, fração sólida ( $E_{s0}$ ) = 0.58 e densidade ( $\rho_s$ ) = 2490 kg/m<sup>3</sup>.

No estudo de simulação via *CFD*, foi utilizada uma configuração de malha tridimensional (3D), hexaédrica e com aproximadamente 311.800 células, confeccionada no *software ICEM®* (malha do tipo não-estruturada). A Figura 2 mostra a vista isométrica da malha em questão.

Neste estudo, foi adotado o modelo Euleriano Granular Multifásico (MEGM), que trata as fases gasosa e sólida como mutuamente interpenetradas, o que torna necessário o uso do conceito de fração de volume para cada uma das fases envolvidas. As leis de conservação de massa e momentum devem ser satisfeitas para cada fase individualmente. Neste sentido, a descrição do fluxo multifásico abrange as frações volumétricas de cada fase. Mais informações sobre o MEGM podem ser encontradas em Santos (2011).

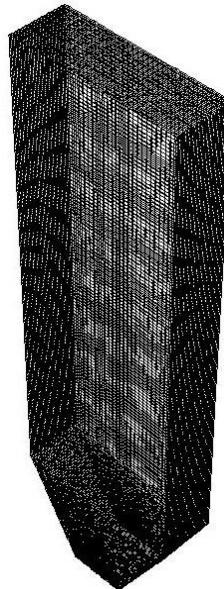


Figura 2 – Vista isométrica da malha 3D utilizada nas simulações.

As velocidades de alimentação e altura de leito estático são parâmetros que foram escolhidos de modo que contemplasse diferentes tipos de jorros, como mostrado na Figura 3. Nesta figura, tem-se: 1 - regime jorro interno (IJ); 2 - regime de *slugging* (SL); 3 – regime de jorro estável (SS).

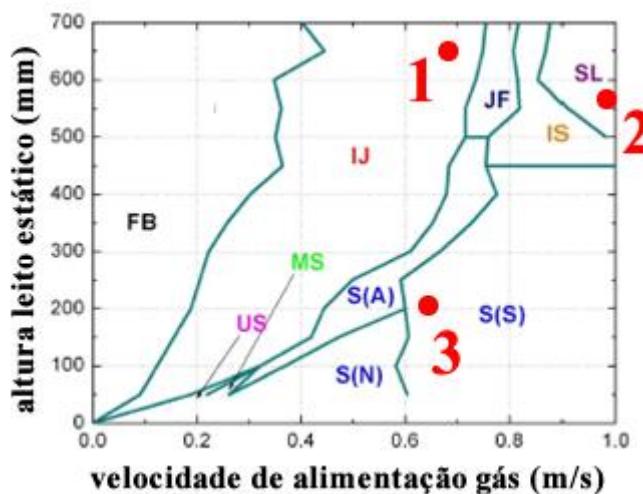


Figura 3 – Mapeamento dos regimes de jorro no decréscimo de velocidade, utilizando partículas de 1.33 mm.

As propriedades que foram adotadas nas simulações realizadas através do software Ansys FLUENT® 14.0, incluindo condições de contorno, estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Condições de contorno utilizadas nas simulações

Modelo Euleriano Multifásico ( <i>implícito</i> )	
Interação fluido-partícula: Gidaspow	
Partícula granular ( $\phi=1$ )	Viscosidade granular: Syamlal-Obrien
	Viscosidade granular: Lun-et-al
	Pressão de sólidos: Lun-et-al
	Distribuição radial: Lun-et-al
Referência da pressão à saída do leito	
Condição de entrada:	Velocidade de fluido
Modelo de Turbulência:	Modelo k-épsilon
Acolplamento Pressão-Velocidade: SIMPLE	
Discretização espacial	Gradiente: <i>Least Squared Cell Based</i>
	Momento: <i>Upwind</i> de 1º ordem
	Fração Vol.: <i>Upwind</i> de 1º ordem
	Turbulência: <i>Upwind</i> de 1º ordem
Parâmetros de Relaxação	Pressão: 0,3
	Viscosidade turbulenta: 0,8
	Temperatura granular: 0,2
	Momentum: 0,1
	Fração volumétrica: 0,5
Critério de convergência dos resíduos	$10^{-3}$
Passo de tempo ( <i>time step</i> )	$10^{-3}$ s

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados simulados foram comparados, sob as mesmas condições, com os dados experimentais obtidos por Chen (2008). As Figuras 4, 5 e 6 mostram o contorno de fração de sólidos simulado e a representação experimental do regime de jato interno, regime de slugging e regime de jorro estável propostas, experimentalmente, por Chen (2008), respectivamente.

A partir da Figura 4, nota-se uma satisfatória concordância dos resultados de simulação com os regimes experimentais, mesmo com a pequena faixa de ocorrência de jorro interno (Figura 3). Esse regime de jorro não é usualmente utilizado, pois grande parte das partículas não são fluidizadas. Neste caso, a pressão exercida pelo gás para efetuar o arraste das partículas não consegue vencer a pressão relacionada ao peso das partículas, fazendo com que haja circulação apenas de uma parte do leito.

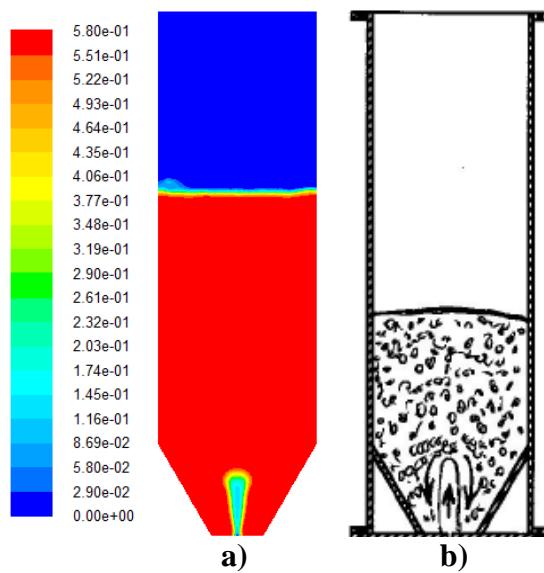


Figura 4 – a) contorno de fração de sólidos obtido numericamente para jato interno; b) esquema representativo do regime de jorro interno obtido por Chen (2008).

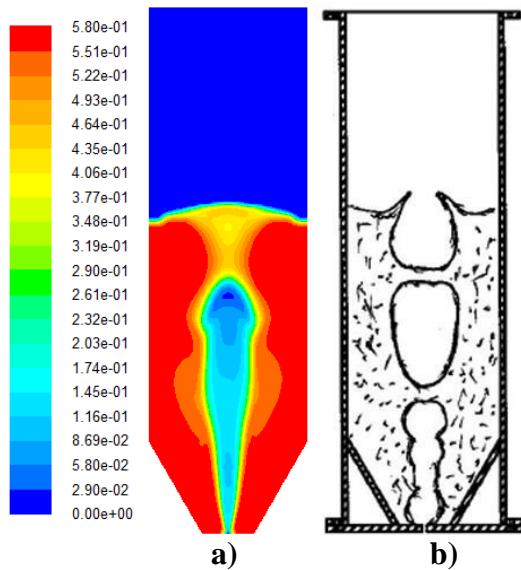


Figura 5 – a) contorno de fração de sólidos obtido numericamente para *slugging*; b) esquema representativo do regime de *slugging* obtido por Chen (2008).

Na Figura 5, pode-se verificar, através do contorno de fração de sólidos simulado, a ocorrência do regime de *slugging*, condizendo com esquema representativo proposto por Chen (2008). Este tipo de jorro é muito comum em materiais do grupo B da classificação de Geldart, porém é mais comum em leitos fluidizados do que em leito de jorro. Isso mostra mais uma vez a grande faixa de utilização das técnicas de *CFD* para simular tipos de escoamento não convencionais do equipamento.

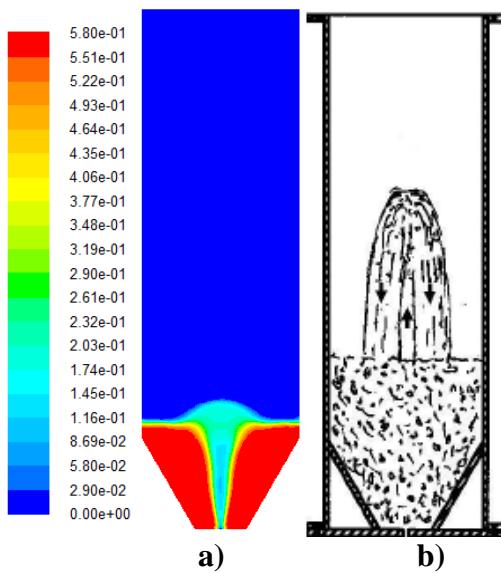


Figura 6 – a) contorno de fração de sólidos obtido numericamente para jorro estável; b) esquema representativo do regime de jorro estável obtido por Chen (2008).

A Figura 6 apresenta resultados de um regime de jorro estável, que é muito utilizado industrialmente, tanto no recobrimento de partículas quanto na secagem de grãos de uma maneira geral. Os resultados representativos do regime de jorro estável mostrou-se um pouco diferente dos resultados simulados, porém de acordo com resultados de Santos (2011), o regime de jorro estável se comporta, fielmente, como o mostrado pela Figura 6.a.

Foram testados ainda outros tipos de jorro, como o de jorro instável, jorro oscilante normal à fresta de alimentação, jorro oscilante perpendicular à fresta de alimentação, jato fluidizado, múltiplos jorros, etc. Porém, devido ao fato deste tipo de leito de jorro apresentar comportamento de jorros diferentes ao se utilizar a velocidade superficial do ar crescente e decrescente, não foi possível confrontar outros tipos de jorros experimentais com os simulados. Isso deve-se à dificuldades que a modelagem Euler-Euler tem na diferenciação de jorros entre as curvas de ida (acréscimo de velocidade) e volta (decréscimo de velocidade).

## 4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nesse trabalho e junto aos dados experimentais de Chen (2008) é possível concluir que:

- 1- A utilização da fluidodinâmica computacional (*CFD*) mostrou-se qualitativamente positiva no estudo de caracterização de regimes em leitos de jorros não convencionais;
- 2- Não foi possível, utilizando a modelagem Euler-Euler, caracterizar regimes onde o decrecimento ou o acréscimo de velocidade definem mais de um tipo de jorro.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHEN, Z., Hydrodynamics, stability and scale-up of slot-rectangular, Tese (pós-doutorado), Vancouver, The University of British Columbia, 2008.
- DOGAN, O. M., FREITAS, L. A. P., LIM, C. J., GRACE, J. R., LUO, B., Hydrodynamics and stability of slot-rectangular spouted beds - part i, Thin bed. *Chem. Eng. Commun.*, v. 181, p. 225–242, 2000.
- DU, W., BAO, X., XU, J. AND WEI, W., Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: assessment of drag coefficient correlations, *Chem. Eng. Sci.*, v. 61, p. 1401-1420, 2006.
- DUARTE, C. R.; MURATA, V. V.; BARROZO, M. A. S., Experimental and numerical study of spouted bed fluid dynamics, *Braz. J. Chem. Eng.*, v. 25, p. 95-107, 2008.
- KAWAGUCHI, T., SAKAMOTO, M. AND TSUJI, T. T., Quasi-three-dimensional numerical simulation of spouted beds in cylinder, *Powder Technol.*, v. 109, p. 3-12, 2000.
- KONDURI, R.K.; ALTWICKER, E.R.; MORGAN III, M.H., Design and scale up of a spouted-bed combustor. *Chem. Eng. Sci.*, v. 54(2), p. 185–204, 1999.
- KRZYWANSKI, R.S.; EPSTEIN, N.; BOWEN, B.D., Multi-dimensional model of a spouted bed. *Can. J. Chem. Eng.*, v. 70(5), p. 858–872, 1992.
- LU, H. L., HE, Y. R., LIU, W. T., DING, J. M., GIDASPOW, D., BOUILLARD, J., Computer simulations of gas-solid flow in spouted beds using kinetic-frictional stress model of granular flow, *Chem. Eng. Sci.*, v. 59(4), p. 865-878, 2004.
- MATHUR, K. B. & GISHLER, N., A technique for contacting gases with coarse solid particles, *AIChE J.*, v. 1, p.157-164, 1955.
- MUJUMDAR, A., Spouted bed technology - a brief review, *Drying*, v. 84, 1984.
- SANTOS, D. A., Contribuições ao estudo da fluidodinâmica em leito de jorro – estudos experimentais e de simulação via CFD, dissertação (mestrado), UFU, 2011.
- TAGHIPOUR, F., ELLIS, N. AND WONG, C., Experimental and computational study of gas-solid fluidized bed hydrodynamics, *Chem. Eng. Sci.*, v. 60, p. 6857-6867, 2005.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelos recursos concedidos no Projeto de Participação Coletiva em Eventos Técnicos-Científicos (PCE-00082-14) ao CNPq e a CAPES pelo apoio técnico-financeiro destinado à execução deste trabalho.