

ESTUDO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL DE UM LEITO DE JORRO CÔNICO COM MISTURA BINÁRIA DE ESFERAS DE VIDRO

Kássia G. dos Santos , Valéria Murata e Marcos A. S. Barrozo

Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila 1410, Uberlândia, Brasil, masbarrozo@ufu.br, <http://www.feq.ufu.br>

Keywords: CFD, Leito de jorro, Mistura de partículas, Segregação.

Abstract. Poucos experimentos sobre mistura de partículas em leito de jorro estão disponíveis na literatura. M. Olazar et al., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 32:2826-2834 (1993) e M. J. San José et al., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 33:1838-1844 (1994) estudaram o comportamento de um leito de jorro cônico, operando com misturas binárias de esferas de vidro. Segundo eles, dependendo da razão de tamanho entre as partículas, pode ocorrer mistura ou segregação das partículas no leito. Neste trabalho, simulações foram realizadas empregando a fluidodinâmica computacional (CFD), a fim de reproduzir alguns aspectos fluidodinâmicos de segregação em leitos de jorro cônico operando com misturas binárias. A posição dos sólidos nos leitos e o fluxo de gás no leito de jorro foram simulados numericamente utilizando o modelo Euleriano Granular, implementado no software Fluent. Os resultados simulados mostraram boa concordância com dados experimentais e podem ser usados para prever as regiões em que ocorre a segregação das partículas no leito de jorro.

1 INTRODUÇÃO

Algumas aplicações do leito de jorro envolvem um conjunto de partículas de tamanho heterogêneo ou mesmo mistura de diferentes partículas, tais como polimerização (Olazar et al., 1997), granulação (Uemaki e Mathur, 1976; Borini et al., 2009), gaseificação de carvão (Tsuji et al., 1989), polimerização catalítica (Bilbao et al., 1989), secagem de pastas e fármacos (Kutsakova, 2004; Marreto et al., 2006; Ciro-Velásquez et al., 2010), pirólise rápida (Aguado et al., 2000; Olazar et al., 2005), dentre outros. No caso da pirólise rápida de biomassa, material inerte, geralmente areia, é adicionado à biomassa para aumentar a estabilidade do leito de jorro, além de facilitar o aquecimento da biomassa no leito. No entanto, o conhecimento do comportamento fluidodinâmico de uma mistura de partículas no leito de jorro é fundamental para o projeto dos reatores de pirólise, que devem operar numa condição em que ocorra a mistura das partículas.

Poucos estudos sobre mistura e segregação de partículas em leitos de jorro estão disponíveis na literatura. Olazar et al. (1993) estudaram a estabilidade de leitos de jorro cônicos e desenvolveram modificações na região de entrada de leitos cônicos a fim de reduzir a segregação de misturas binárias de esferas de vidro. Foram realizados vários experimentos com misturas binárias de partículas de esferas de vidro entre 1 e 8 mm, que foram utilizados para desenvolver correlações para previsão da velocidade de jorro mínimo de misturas em leitos de jorro com contator na entrada. Em continuação ao trabalho de Olazar et al. (1993), San José et al. (1994) estudaram os efeitos de segregação radial e longitudinal para misturas binárias e ternárias em leito de jorro cônico com contator. Além disso, eles estabeleceram correlações úteis para a concepção do contator, que relacionam o índice de global de mistura às variáveis de projeto dos contadores e às propriedades da mistura de sólidos.

Atualmente, simulações numéricas têm sido utilizadas para obter resultados fluidodinâmicos de vários equipamentos, incluindo o leito de jorro. Essas simulações, quando comparadas aos dados experimentais, podem ser extremamente úteis na obtenção de informações em regiões de difícil medida (Kawaguchi et al., 2000).

Vários trabalhos sobre simulações CFD da fluidodinâmica de leitos de jorro estão disponíveis na literatura (Duarte et al., 2005; Du et al., 2006; Wang et al., 2006; Zhong et al., 2006; Zhonghua e Mujumdar, 2008; Lourenço et al., 2008; Vieira Neto et al., 2008; Tekeuchi et al., 2008; Cunha et al., 2009; Santos et al., 2009-a). Quanto à simulação CFD de mistura de partículas em leitos móveis, há vários trabalhos sobre mistura e segregação de partículas em leitos fluidizados (Lathouwers e Bellan, 2000; Feng e Yu, 2006; Huilin et al., 2007). Em relação ao leito de jorro, há poucos trabalhos que consideram mais de uma fase granular. Santos et al. (2009-b) simularam um leito de jorro composto por mono-partículas, considerando duas fases granulares iguais, dispostas em regiões diferentes no leito. Assim, os autores verificaram que a utilização do modelo que define o arraste entre as duas fases granulares melhora a descrição das interações entre as partículas, proporcionando um cálculo mais preciso da relação entre a velocidade e a queda de pressão, inclusive uma melhor predição da condição de jorro mínimo. Foi observado que os melhores resultados foram obtidos quando as mono-partículas foram simuladas como uma mistura de partículas com o percentual de mistura de 50%. Duarte et al. (2009) realizaram experimentos e simulações CFD de um leito de jorro semi-cilíndrico com mistura de partículas. Os valores de velocidade das partículas obtidos experimentalmente foram comparados com os valores simulados com boa concordância. No entanto, pouco se conhece sobre a capacidade das simulações reproduzirem de forma coerente as informações sobre os fenômenos de mistura e segregação que eventualmente ocorrem leitos de jorro, quando estes operam com misturas de partículas.

No presente trabalho, alguns aspectos fluidodinâmicos do leito de jorro proposto por

Olazar et al. (1993) e San José et al. (1994) foram estudados empregando a técnica de fluidodinâmica computacional. Para tal, empregou-se o Modelo Euleriano Granular, adequado à simulação de sistemas multifásicos nos quais há fases particuladas com alto empacotamento ou quando a força gravitacional é preponderante para a separação entre fases. A relação entre vazão e queda de pressão na condição de jorro mínimo foi reproduzida pelas simulações com boa concordância com os dados experimentais. Os perfis de fração volumétrica das fases auxiliaram no cálculo do índice de mistura, que se mostraram coerentes com os relatados por Olazar et al. (1993) e San José et al. (1994).

2 DESCRIÇÃO DO MODELO

Neste trabalho, empregou-se o Modelo Euleriano Granular, que utiliza a abordagem Euler-Euler, e trata todas as fases como contínuas e interpenetrantes. As equações de conservação são escritas para ambas as fases, o que dá origem a um sistema de equações similares para as duas fases, facilitando a manipulação matemática do sistema. A descrição adequada das forças interfaciais, presentes nas equações de balanço de quantidade de movimento de ambas as fases, é de suma importância na precisão das simulações, sendo a força de arraste a principal força que age sobre as partículas. O modelo de arraste empregado entre a fase gasosa e as fases granulares foi o modelo de Gidaspow et al. (1992). O gradiente de pressão de sólidos é definido pela teoria cinética granular definida por Lun et al. (1984).

A estratégia de simulação deste trabalho foi a mesma adotada por Santos et al. (2009a), onde pode-se encontrar a descrição detalhada dos modelos empregados nas simulações. Devido à presença de outra fase granular, há a adição de um termo de troca de momento entre as fases granulares, definido por (Syamlal, 1987):

$$K_{s_1s_2} = \frac{3(1+e_{s_1s_2}) \left(\frac{\pi}{2} + C_{fr,s_1s_2} \frac{\pi^2}{8} \right) \alpha_{s_2} \rho_{s_2} \alpha_{s_1} \rho_{s_1} (d_{s_1} + d_{s_2})^2 g_{0,s_1s_2}}{2\pi (\rho_{s_1} d_{s_1}^3 + \rho_{s_2} d_{s_2}^3)} \left| \overline{v_{s_1}} - \overline{v_{s_2}} \right| \quad (1)$$

em que $e_{s_1s_2}$ é o coeficiente de restituição entre as fases, C_{fr,s_1s_2} é o coeficiente de fricção entre as partículas das fases sólidas, d_{s_1} e d_{s_2} são os diâmetros das partículas das fases s_1 e s_2 ; g_{0,s_1s_2} é a função de distribuição radial entre as fases; α_{s_1} e α_{s_2} são as frações volumétricas, ρ_{s_1} e ρ_{s_2} são as densidades das fases s_1 e s_2 e $\left| \overline{v_{s_1}} - \overline{v_{s_2}} \right|$ é a velocidade relativa entre as fases.

Devido à presença de uma segunda fase granular, é preciso calcular o limite máximo de empacotamento baseado no empacotamento das duas fases.

Como as partículas menores se acumulam entre as partículas maiores, há um aumento no limite de empacotamento. Para uma mistura binária com diâmetros $d_{s_1} > d_{s_2}$, a composição da mistura é definida por (Fedors e Landell, 1979):

$$X_B = \alpha_{s_1} / (\alpha_{s_1} + \alpha_{s_2}) \quad (2)$$

onde:

$$X_B \leq \frac{\alpha_{s_1,\max}}{(\alpha_{s_1,\max} + (1 - \alpha_{s_1,\max}) \alpha_{s_2,\max})} \quad (3)$$

O limite máximo de empacotamento para uma mistura binária é dado por (Fedors e

Landell, 1979):

$$\alpha_{s,\max} = \left[1 - \sqrt{\frac{d_{s2}}{d_{s1}}} \right] \left(\alpha_{s1,\max} + (1 - \alpha_{s1,\max}) \alpha_{s2,\max} \right) (1 - X_B) + \alpha_{s1,\max} \quad (4)$$

A força de ascensão e a força mássica virtual não são significativas para o caso estudado. A viscosidade friccional de sólidos foi desprezada, baseado no trabalho de [Du et al. \(2006\)](#), que revela pouca influência da inclusão de um Modelo Friccional na fluidodinâmica do leito.

As condições de contorno associadas ao modelo, consideram que a injeção de ar na entrada do leito é somente na direção axial e tem perfil parabólico, sendo a velocidade de sólidos na entrada nula. Na saída, os gradientes de velocidade para as duas fases na direção axial é zero e a pressão é a atmosférica. No eixo de simetria, os gradientes de velocidade para as duas fases e para a temperatura granular na direção radial são nulos, enquanto que nas paredes, foi adotada uma condição de não deslizamento (*no slip*).

3 METODOLOGIA

3.1 Condições Experimentais

Neste trabalho, duas misturas foram utilizadas para analisar a metodologia de simulação CFD, as quais denominou-se como Caso 1 e Caso 2, descritos na [Tabela 1](#). Foram utilizadas partículas de esferas de vidro de 1, 4 e 7 mm, com densidade de 2420 kg/m^3 .

A [Figura 1](#) mostra a geometria do leito de jorro, enquanto a [Tabela 2](#) apresenta um resumo das condições operacionais, também utilizadas nas simulações computacionais. Os detalhes sobre a realização dos experimentos com mistura de esferas de vidro em leito de jorro cônico são melhor descritos por [Olazar et al. \(1993\)](#) e [San José et al. \(1994\)](#).

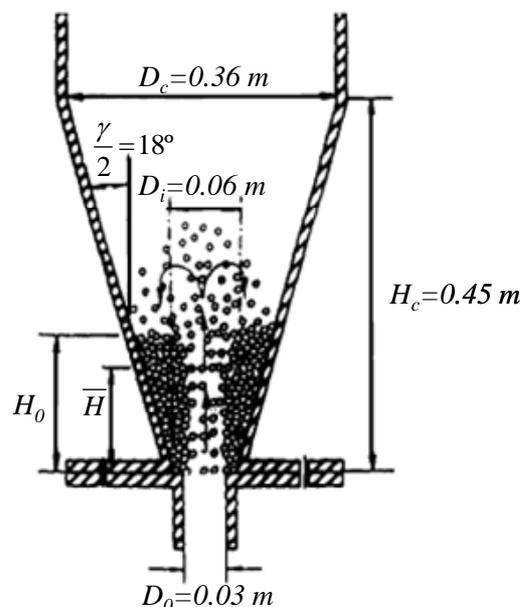


Figura 1 – Geometria do leito utilizado por [Olazar et al. \(1993\)](#) e [San José et al. \(1994\)](#)

	Caso 1	Caso 2
d_{s_1}	4 mm	7 mm
d_{s_2}	1 mm	1 mm
H_0	0,10 m	0,22 m
Referência	Olazar et al. (1993)	San José et al. (1994)

Tabela 1 – Estudos de caso que serão reproduzidos nas simulações CFD.

Parâmetro	Descrição	
D_c [m]	Diâmetro da coluna	0,36
D_i [m]	Diâmetro de entrada	0,06
D_o [m]	Diâmetro de entrada	0,03
γ	Ângulo do cone	36°
H_c [m]	Altura do cone	0,45
\bar{H}	Altura que delimita a metade do leito	0.122 (Caso 2)
ρ_g [kg m ⁻³]	Densidade do gás	1,225
ρ_p [kg m ⁻³]	Densidade das esferas de vidro	2420
μ_g [kg m ⁻¹ s ⁻¹]	Viscosidade do gás	1,7894 e-05
e_{ss}	Coefficiente de restituição	0,90
ε	Porosidade do leito	0,39

Tabela 2– Condições experimentais utilizadas por [Olazar et al. \(1993\)](#) e [San José et al. \(1994\)](#) e adotadas nas simulações.

A fim de quantificar a segregação, os autores coletaram amostras das partículas no leito através de uma sonda conectada à uma bomba de sucção. Assim, com o deslocamento da sonda pelo leito foi possível quantificar a distribuição axial e radial de partículas. A fração mássica da maior partícula no leito pode ser definida pela Eq. (2).

O nível de segregação é então expresso pela definição do índice de mistura M_b , que relaciona a proporção da fração da maior partícula na região superior do leito com a média total no leito, como mostra a Eq. (5).

$$M_b = \left(\overline{X_B} \right)_u / \overline{X_B} \quad (5)$$

no qual $\overline{X_B}$ é a média da fração das maiores partículas no leito todo e $\left(\overline{X_B} \right)_u$ é a média da fração das maiores partículas na região superior do leito, definido por:

$$\left(\overline{X_B} \right)_u = \frac{\sum_0^r \left\{ \Delta r \sum_H^H \left[\Delta h \sum_0^{2r} \left(X_B r \Delta \theta \right) \right] \right\}}{V / 2} \quad (6)$$

A segregação axial é então quantificada por meio da definição de $\left(\overline{X_B} \right)_h$, como mostra a Eq. (7), que pode ser definido como a média da fração das maiores partículas a uma certa altura h do leito.

$$\left(\overline{X_B} \right)_h = \frac{\sum_0^r \left[\Delta r \sum_0^{2r} \left(X_B r \Delta \theta \right) \right]}{\sum_0^r \left[\Delta r \sum_0^{2r} \left(r \Delta \theta \right) \right]} \quad (7)$$

3.2 Malha Computacional

Foi contruída uma malha computacional estruturada sobre a geometria do leito, utilizando software Gambit 2.3.16. A malha era inicialmente composta por 5400 elementos quadriláteros. Um teste de malha foi realizado, fazendo sucessivas divisões das células, de forma a contituiem três malhas com diferentes quantidades de células, como mostra a [Figura 2](#). A [Figura 3](#) mostra a comparação da velocidade do ar para as três malhas testadas. A malha escolhida para proceder às simulações foi a Malha 2 (19440 células), pois apresenta uma considerável redução no tempo de simulação quando comparado com a Malha 3, obtendo um resultado muito próximo ao obtido pela Malha 3.

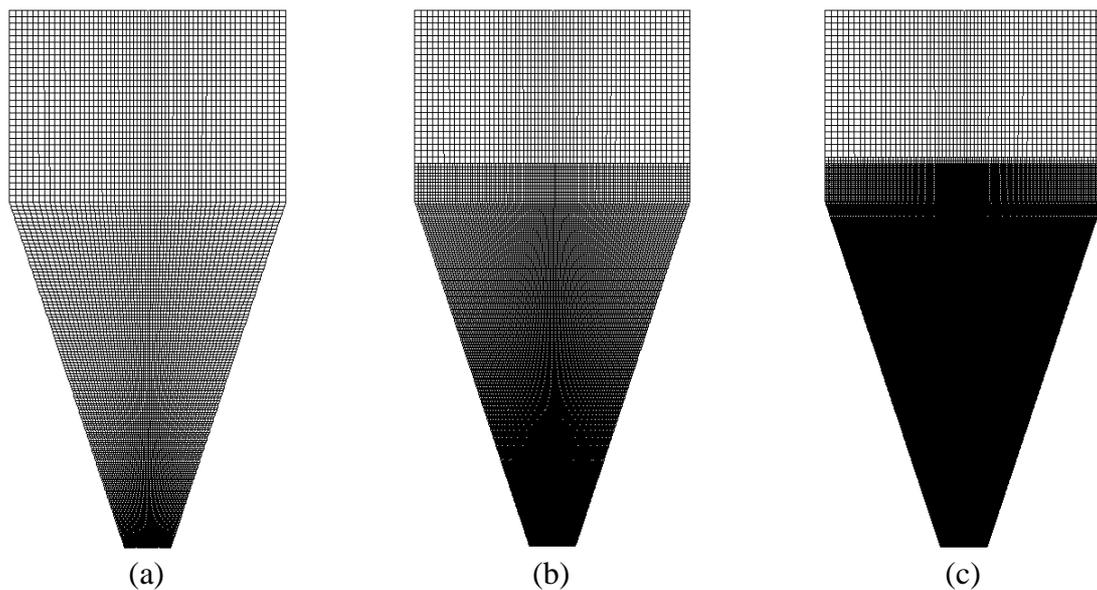


Figura 2 – Malha Computacional: (a) Malha 1- 5400 células; (b) Malha 2- 19440 células; (c) Malha 3- 75690 células.

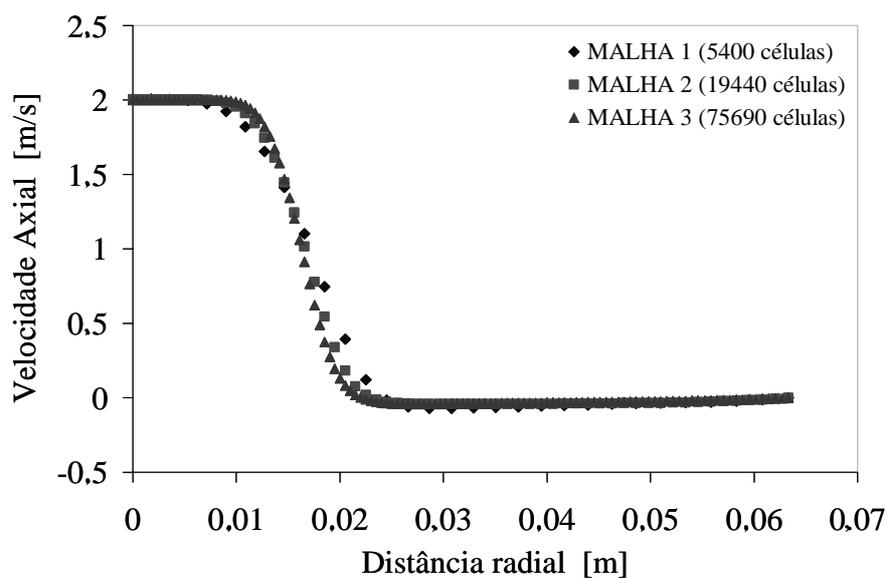


Figura 3 – Teste de independência da malha: Distribuição radial da velocidade axial de ar.

3.3 Procedimento de Simulação

O código computacional Fluent resolve pelo método de volumes finitos o conjunto de equações formado pelas equações de balanço de massa e quantidade de movimento para cada fase, bem como as equações constitutivas, que contabilizam as forças que atuam no sistema. Estas forças são relativas à troca de momento entre as fases e às interações entre as partículas.

O conjunto das equações de balanço e equações constitutivas foi resolvido utilizando a técnica de volumes finitos, empregada pelo software de CFD Fluent 12.2.1. Adotou-se o algoritmo SIMPLE para estabelecer o acoplamento velocidade-pressão. São necessários de 5 a 10 segundos de simulação em tempo real para o jorro atingir o estado estacionário. O incremento máximo no tempo foi de $5 \cdot 10^{-5}$ segundos e o critério de convergência estabelecido foi da ordem de $1 \cdot 10^{-3}$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Condição de Jorro Mínimo para a Mistura Binária – Caso 1

De acordo com [Olazar et al. \(1993\)](#), para uma mistura de 50% em massa para partículas de 1 e 4 mm, à uma altura de leito estático de 0,10 m, a curva característica da mistura apresenta formato similar à de sistemas monodispersos, sendo que a da mistura apresenta valores de queda de pressão intermediários aos sistemas monodispersos correspondentes. O valor máximo da queda de pressão para a mistura, obtido com o incremento da velocidade de ar, corresponde a aproximadamente 1370 Pa, enquanto que para um leito contendo apenas partículas de 4 mm, a queda máxima de pressão é cerca de 1400 Pa e para o leito operando apenas com a partículas de 1 mm, é cerca de 1310 Pa. Quanto à condição de jorro mínimo, a velocidade de jorro mínimo da mistura (cerca de 5 m/s) está entre a velocidade de jorro mínimo dos sistemas monodispersos (aproximadamente 3,9 m/s para esferas de vidro de 1 mm e acima de 9 m/s para esferas de vidro de 4 mm). Isso mostra que as partículas de ambos os tamanhos contribuem para a dinâmica do leito. A formação do jorro incipiente ocorre na mistura à uma velocidade próxima à das menores partículas. Os autores observaram que a histerese, comumente encontrada durante a volta da curva característica, é mais pronunciada para a mistura do que para sistemas monodispersos.

Simulações CFD foram realizadas para condições próximas ao jorro mínimo e de jorro estável, a fim de identificar as condições de jorro mínimo para a mistura. A [Tabela 3](#) apresenta a comparação entre os experimentos e a simulação CFD para a condição de jorro mínimo.

A [Figura 4](#) apresenta os contornos de fração volumétrica de ar para a mistura do Caso 1, na qual é possível observar que a velocidade de jorro mínimo obtida nas simulações está entre 4,5 e 5 m/s, muito próxima ao valor experimental de 5 m/s. Nota-se também que a porosidade do leito varia de acordo com a distribuição das partículas no leito.

	Experimental	Simulação CFD
v_{ms}	5 m/s	4,5 a 5 m/s
ΔP_{ms}	$\cong 1003$ Pa	1000 Pa

Tabela 3– Comparação entre os experimentos e simulação CFD do Caso 1, referentes á condição de jorro mínimo.

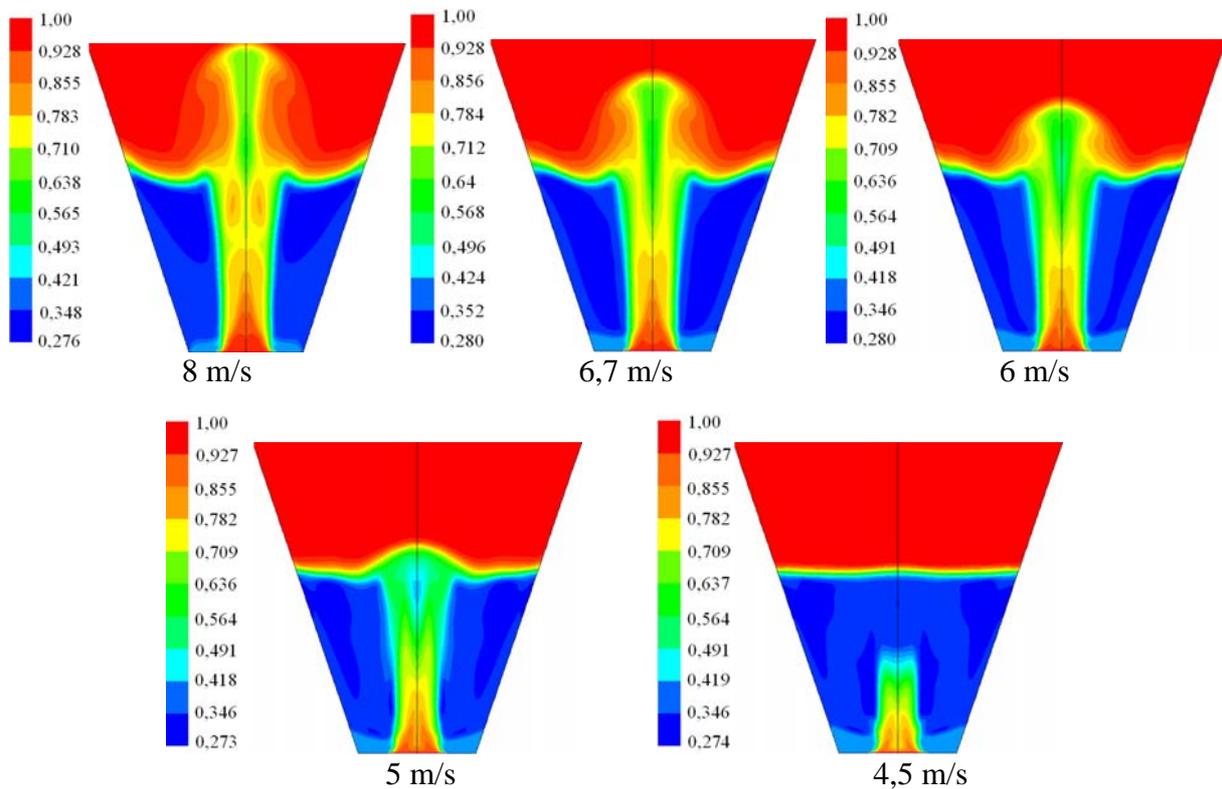


Figura 4 – Contorno de fração volumétrica de ar obtidos nas simulações CFD: evolução da queda de pressão com a velocidade do ar para o Caso 1.

4.2 Mistura e Segregação de Partículas em Leito de Jorro – Caso 2

Assim como nos sistemas mono-dispersos, no leito de jorro contendo uma mistura binária de partículas de diferentes tamanhos e densidades, pode ocorrer mistura e segregação de partículas. A segregação ocorre principalmente devido à diferença de velocidade terminal das partículas. Segundo [San José et al. \(1994\)](#), a segregação é produzida por uma combinação de fenômenos que ocorrem simultaneamente, como as colisões entre partículas de diferentes tamanhos na região de fonte ([Kutluoglu et al., 1983](#)) e a percolação das partículas menores entre os espaços vazios da matriz de partículas maiores ([Robinson e Waldie, 1978](#); [Cook e Bridgewater, 1978](#)). Durante colisões que ocorrem na região de fonte, ocorre um espalhamento das partículas nesta região, que é mais pronunciado para partículas menores e menos densas do que para partículas maiores. Esse fenômeno pode ser considerado o principal fator que promove a segregação ([Kutluoglu et al., 1983](#)).

A [Figura 5](#) apresenta a distribuição axial da média da fração mássica da maior partícula no leito de jorro, para o Caso 2: uma mistura de partículas com 50% de esferas de vidro de $d_{s_1}=7$ mm e 50% de esferas de vidro de $d_{s_2}=1$ mm, a uma altura inicial de leito estático de 0,22 m.

Os dados experimentais de [San José et al. \(1994\)](#), revelam que o componente de maior tamanho está em uma proporção maior na região superior do leito. Provavelmente, a segregação na direção axial do leito é fortemente influenciada pela percolação das menores partículas por entre as maiores. Os valores médios de fração mássica do componente maior encontrados pelas simulações CFD são próximos aos obtidos experimentalmente, como mostra a [Figura 5](#).

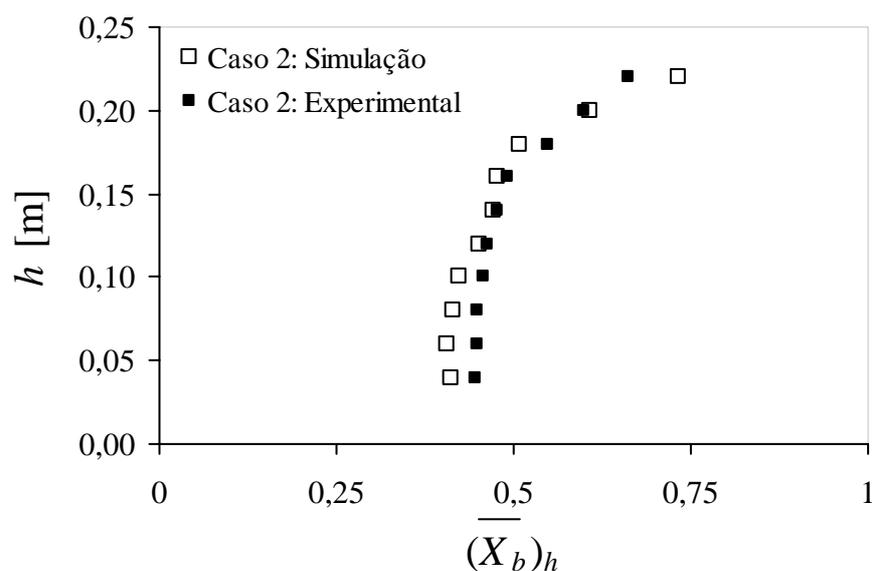


Figura 5 – Valor médio da fração mássica da maior partícula à diferentes alturas de leito h , para o Caso 2.

Analisando os contornos de fração volumétrica de sólidos, apresentados na Figura 6, pode-se verificar que as partículas maiores se acumulam não somente na parte superior da região anular, mas também de na parte interna desta. Assim, quanto à distribuição radial das partículas, podemos verificar que próximo à parede, há uma maior concentração das menores partículas, o que está de acordo com os dados experimentais de San José et al. (1994).

A segregação produzida na região de fonte é importante, já que as partículas maiores e mais densas possuem um tempo de recirculação menor devido à uma trajetória mais curta. Assim, as maiores partículas sobem a uma altura menor na fonte e caem numa região mais interna da região anular, mais distante da parede e tendem a seguir posições radiais próximas à interface entre as regiões de jorro e anular, como é observado na Figura 6 (a). Já as partículas menores circulam preferencialmente na periferia da região de anular, descrevendo ciclos mais amplos, que as levam ao contator na entrada (San Jose et al, 1994; Kutluoglu et al., 1983).

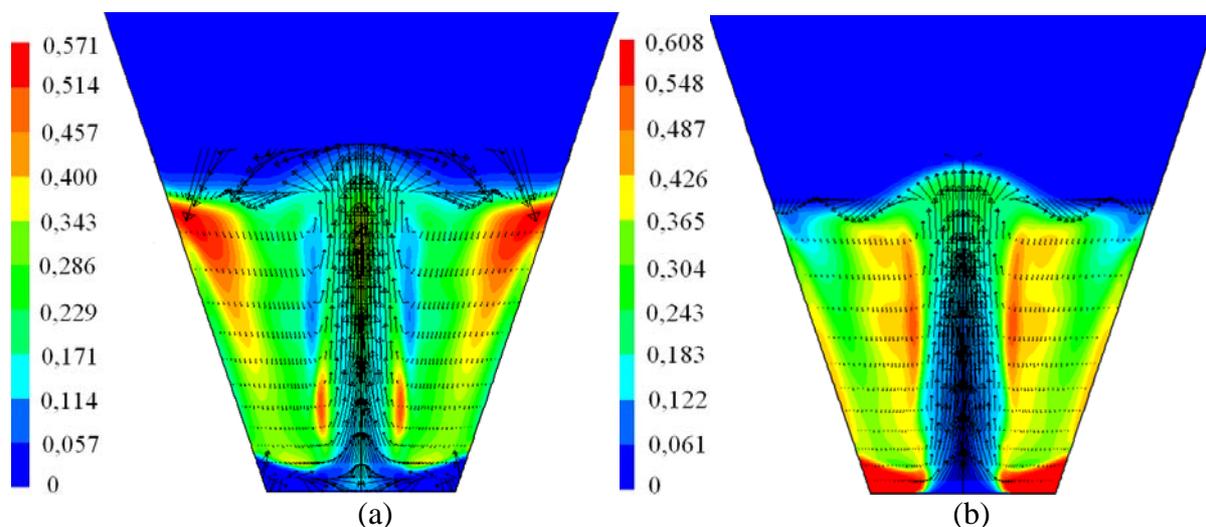


Figura 6 – Contorno de fração volumétrica de sólidos sobreposto pelos vetores de velocidade do sólido, referentes ao Caso 2: (a) $d_{s_1} = 7$ mm ; (b) $d_{s_2} = 1$ mm.

A Figura 7 apresenta a variação do índice de mistura, M_b , definido pela Eq. (5), com o aumento da velocidade de entrada de ar. Os resultados experimentais referentes ao Caso 2 mostram que à medida que se aumenta a relação entre a velocidade de ar e a velocidade de jorro mínimo, ocorre uma redução da segregação entre as partículas. Os valores de índice de mistura obtidos por meio das simulações CFD se mostraram muito próximos aos obtidos pelos experimentos de San José et al. (1994).

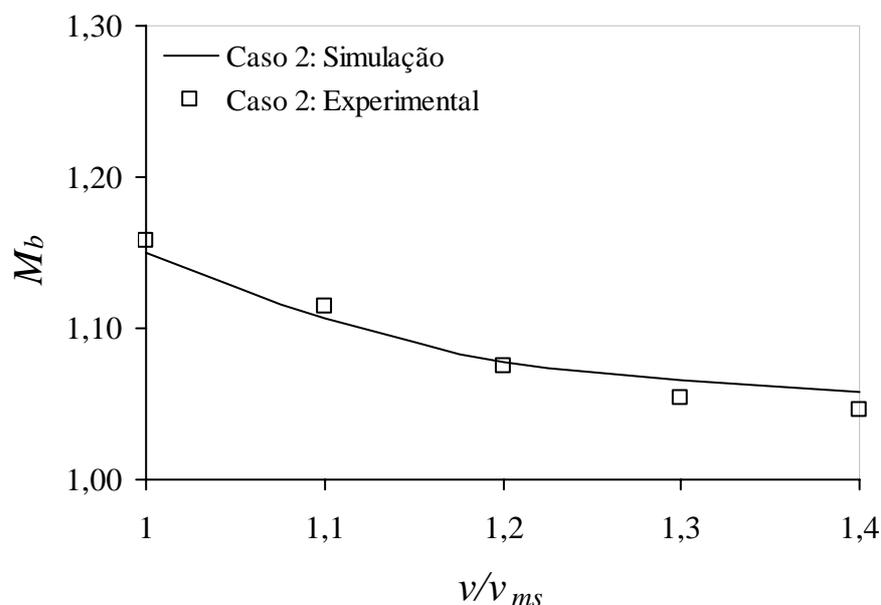


Figura 7– Efeito relativo da velocidade do ar sobre o índice de mistura (M_b), para o Caso 2.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, a fluidodinâmica de um leito de jorro operando com mistura de esferas de vidro foi analisada, empregando a técnica de simulação CFD.

As simulações foram capazes de prever a velocidade e a queda de pressão no jorro mínimo com ótima concordância com os dados experimentais. Os perfis de contorno possibilitaram visualizar as regiões de segregação no leito, onde as partículas maiores foram encontradas em maior proporção na parte interna e superior da região anular, o que está de acordo com os experimentos de San José et al. (1994). Além disso, o efeito do aumento da velocidade de ar na entrada sobre o índice de mistura de partículas no leito foi reproduzido pelas simulações, visto que a segregação foi atenuada com o aumento da velocidade de ar.

REFERÊNCIAS

- Aguado, R., Olazar, M., Barona, A. e Bilbao, J., Char-formation kinetics in the pyrolysis of sawdust in a conical spouted bed reactor. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 75:583–588, 2000.
- Bilbao, J., Olazar, M., Romero, A. e Arandes, J. M., Optimization of the Operation in a Reactor with Continuous Catalyst Circulation in the Gaseous Benzyl Alcohol Polymerization. *Chemical Engineering Communication*, 75:121–134, 1989.
- Borini, G. B., Andrade, T. C. e Freitas, L. A. P., Hot melt granulation of coarse pharmaceutical powders in a spouted bed. *Powder Technology*, 189:520–527, 2009.
- Ciro-Velásquez, H. J., Cunha, R. L. e Menegalli, F. C., Drying of Xanthan Gum Using a

- Two-Dimensional Spouted Fluidized Bed (2DSFB) with Inert Particles: Performance and Rheological Considerations. *Drying Technology*, 28(3):389–401, 2010.
- Cook, H. H. e Bridgewater, J., Segregation in spouted beds, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 56:636, 1978.
- Cunha, F. G., Santos, K. G., Ataíde, C. H., Epstein, N. e Barrozo, M. A. S., Annatto Powder Production in a Spouted Bed: An Experimental and CFD Study. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48:976–982, 2009.
- Du, W., Bao, X., Xu, J. e Wei, W., Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Influence of frictional stress, maximum packing limit and coefficient of restitution of particles. *Chemical Engineering Science*, 61:4558–4570, 2006.
- Duarte, C. R., Barrozo, M. A. S., Santos, D. A. e Petri Júnior, I., Estudo Experimental e de Simulação da Fluidodinâmica do Leito de Jorro Operando com Mistura de Partículas. *VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica*, 2009, Uberlândia. Anais do VIII COBEQ-IC, 2009.
- Duarte, C. R.; Murata, V. V. e Barrozo, M.A.S., A Study of the Fluid Dynamics of the Spouted Bed Using CFD. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 22:263–270, 2005.
- Fedors, R. F. e Landell, R.F., An Empirical Method of Estimating the Void Fraction in Mixtures of Uniform Particles of Different Size. *Powder Technology*, 23:225–231, 1979.
- Feng, Y. Q. e Yu, A. B., Discrete particle simulation of size segregation of particle mixtures in a gas fluidized bed, *China Particuology*, 4:122–126, 2006.
- Gidaspow, D., Bezbaruah R. e Ding, J., Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds: Kinetic Theory Approach. In: *Proc. of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization*, 75-82, 1992.
- Huilin, L., Yunhua, Z., Ding, J., Gidaspow, D. e Wei, L., Investigation of mixing/segregation of mixture particles in gas–solid fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, 62:301–317, 2007.
- Kawaguchi, T., Sakamoto, M. e Tsuji, T. T., Quasi-three-dimensional numerical simulation of spouted beds in cylinder. *Powder Technology*, 109:3–12, 2000.
- Kutluoglu, E., Grace, J. R., Murchie, K. W. e Cavanagh, P. H., Particle segregation in spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61: 308–316, 1983.
- Kutsakova, V. E., Drying of Liquid and Pasty Products in a Modified Spouted Bed of Inert Particles. *Drying Technology*, 22(10):2343–2350, 2004.
- Lathouwers, D. e Bellan, J., Modeling and simulation of bubbling fluidized beds containing particle mixtures. *Proceedings of the Combustion Institute*, 28: 2297–2304, 2000.
- Lourenço, R. O. , Santos, K. G., Murata, V. V., Duarte, C. R., Henrique, H. M. e Barrozo, M. A. S., Identification of the spouted bed flow regime by simulation and experimental data. *Materials Science Forum*, 591: 329–334, 2008.
- Lun, C. K.; Savage, S. B., Jeffrey, D. J. e Chepuriniy, N., Kinetic Theories of granular flow: inelastic particles in a Couette flow and slightly inelastic particles in a general flow field. *J. Fluid Mech.* 140:223–256, 1984.
- Marreto, R. N., Freire, J. T. e Freitas, L. A. P., Drying of Pharmaceuticals: The Applicability of Spouted Beds. *Drying Technology*, 24: 327–338, 2006.
- Olazar, M., Aguado, R., Vélez, D., Arabiourrutia, M. e Bilbao, J., Kinetics of Scrap Tire Pyrolysis in a Conical Spouted Bed Reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44:3918–3924, 2005.
- Olazar, M., Arandes, J. M, Zabala, G., Aguayo, A. T. e Bilbao, J., Design and Operation of a Catalytic Polymerization Reactor in a Dilute Spouted Bed Regime. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36:1637–1643, 1997.
- Olazar, M., San José, M. J., Pefias, F. J., Aguayo, A. T. e Bilbao, J., Stability and

- Hydrodynamics of Conical Spouted Beds with Binary Mixtures. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 32:2826-2834, 1993.
- Robinson, T. e Waldie, B., Particle Cycle Times in a Spouted Bed of Polydisperse Particles. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 56:632-635, 1978.
- San José, M. J., Olazar, M., Pefias, F. J. e Bilbao, J., Segregation in Conical Spouted Beds with Binary and Ternary Mixtures of Equidensity Spherical Particles, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 33:1838-1844, 1994.
- Santos, D. A., Petri Júnior, I., Barrozo, M. A. S. e Duarte, C. R., Mixture of Particles' Influence in Computer Simulations of a Spouted Bed, *In: Seventh International Latin American Conference on Powder Technology, 2009b*, Atibaia-SP, Brasil. Anais do XVII PTECH, 2009b, v. CD ROM. p. 546-551.
- Santos, K. G., Murata, V. V. e Barrozo, M. A. S., Three-dimensional computational fluid dynamics modeling of spouted bed. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 87:211-219, 2009a.
- Syamlal, M., The Particle-Particle Drag Term in a Multiparticle Model of Fluidization. *National Technical Information Service*, Springfield, VA, 1987. DOE/MC/21353-2373, NTIS/DE87006500.
- Takeuchi S., Wang S. e Rhodes, M., Discrete element method simulation of three-dimensional conical-base spouted beds. *Powder Technology*, 184:141-150, 2008.
- Tsuji, T., Shibata, T., Yamaguchi, K. e Uemaki, O., Mathematical Modelling of Spouted Bed Coal Gasscation. Proceeding of the International Conference on Coal Science. *The Society of Chemical Engineers: Tokyo*, I:457-460, 1989.
- Uemaki, O. e Mathur K. B., Granulation of Ammonium Sulfate Fertilizer in a Spouted Bed, *Ind. Eng. Chem., Process Des. Dev.*, 15(4):504-508, 1976.
- Vieira Neto, J.L., Barrozo, M. A. S., Duarte, C. R. e Murata, V. V., Effect of a draft tube on the fluid dynamics of a spouted bed: Experimental and CFD Studies. *Drying Tech.*, 26:299-307, 2008.
- Wang, Z. G., Bi H. T. e Lim, C. J., Numerical Simulations of Hydrodynamic Behaviors in Conical Spouted Beds. *China Particuology*, 4:194-203, 2006.
- Zhong, W., Chen X. e Zhang, M., Hydrodynamic characteristics of spout-fluid bed: pressure drop and minimum spouting/ spout-fluidizing velocity. *Chemical Engineering Journal*, 118:37-46, 2006.
- Zhonghua, W. e Mujundar, S. S., CFD modeling of gas-particle flow behavior in spouted beds. *Powder Technology*, 183(2):260-272, 2008.