

ANÁLISE COMPUTACIONAL DA SEGREGAÇÃO DE UMA MISTURA DE CASCA DE CACAU E AREIA EM UM LEITO DE JORRO APLICADO À PIROLISE DE BIOMASSA

M. S. ARAUJO¹, P. S. ALMEIDA², D. C. RIBEIRO^{1,2}, T. S. LIRA^{1,2}

¹ Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia e Tecnologia

² Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-Graduação em Energia
E-mail para contato: taisa.lira@ufes.br

RESUMO – Dentre as tecnologias de conversão térmica de biomassa, a pirólise é considerada uma das mais promissoras e o leito de jorro é um reator potencial para o processo. Para favorecer o regime de jorro e a transferência de calor no interior do leito, partículas de um material inerte, geralmente areia, são utilizadas e essa mistura pode gerar regiões de alta segregação, não desejável. O estudo de segregação em leito de jorros é complexo, pois as partículas circulam em três regiões com comportamentos específicos. Uma ferramenta poderosa para investigação desse sistema multifásico é o emprego de *softwares* de simulação via fluidodinâmica computacional (CFD). O objetivo deste trabalho é investigar, via CFD, o comportamento da segregação de misturas de partículas de areia e casca de cacau em um leito de jorro. As simulações foram realizadas utilizando o modelo Euleriano Granular Multifásico para descrever o escoamento gás-sólido e a malha utilizada foi bidimensional estruturada. A base do leito apresentou maiores índices de segregação, com maior presença de partículas de areia. Entretanto, de maneira geral, os sistemas estudados apresentaram baixa segregação.

1. INTRODUÇÃO

A pirólise é caracterizada pela degradação térmica do combustível sólido, com ausência ou presença mínima de agente oxidante, gerando produtos de alto poder calorífico. A fração líquida normalmente é o produto mais desejado devido a facilidade de transporte e armazenagem, e potencial de conversão em produtos químicos. A pirólise rápida é utilizada com o intuito de maximizar a produção da fração líquida e é conduzida a elevadas taxas de aquecimento, moderadas temperaturas finais e tempos curtos de residência. A taxa de aquecimento é a variável mais difícil de ser controlada. É favorecida em reatores que permitem o contato direto entre o sólido a ser pirolisado e o meio de aquecimento. O leito de jorro destaca-se como um reator potencial, uma vez que o movimento uniforme e cíclico das partículas em seu interior proporciona um bom contato fluido-sólido, garantindo elevadas taxas de transferência e calor de massa (Gómez, 2002).

As partículas de biomassa, em geral, possuem fluidização pobre, por isso, algum tipo de material inerte, geralmente areia, é adicionado, com a finalidade de aumentar a estabilidade do regime de jorro e contribuir no aquecimento da biomassa. Em reatores de leito móvel,

cerca de 90% da transferência de calor ocorre por condução. No entanto, essa mistura de partículas com formas, tamanhos e densidades diferentes pode ocasionar o fenômeno de segregação que reduz a transferência de calor, gerando regiões de alta temperatura e aglomeração de biomassa. O comportamento de misturas de partículas em leito de jorro é complexo. As partículas estão sujeitas à recirculação cíclica entre as regiões de jorro, anular e fonte, e cada região possui um comportamento de fluxo específico (Santos et al., 2013; Ren et al., 2012).

O nível de segregação em uma dada região do leito pode ser descrito através do índice de mistura, um adimensional definido pela Equação 1, em que X_B é a fração mássica das maiores partículas em uma dada região do leito, e X_{B0} é a fração das mesmas em todo o leito.

$$I_m = \frac{X_B}{X_{B0}} \quad (1)$$

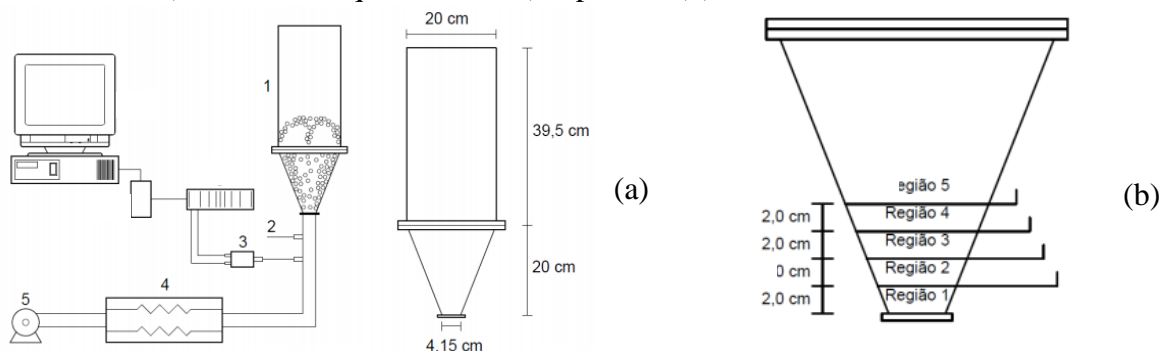
Uma ferramenta poderosa para investigação da fluidodinâmica em leitos de jorro é o emprego de softwares de simulação via fluidodinâmica computacional, que se baseia na solução de equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia através de métodos numéricos. Diante do exposto, este trabalho tem o objetivo de estudar a segregação em mistura de partículas de casca de cacau e areia em um leito de jorro via CFD, visando contribuir para aplicação desse equipamento como reator de pirólise rápida.

2. METODOLOGIA

2.1. Análise experimental da segregação

O Leito de jorro utilizado é do tipo cônico. A base cônica do leito é adaptada para inserção de guilhotinas que permitem a amostragem em diferentes posições axiais para análise da segregação. As entradas permanecem obstruídas durante a operação do equipamento, evitando perda de material e influência nos resultados. Esquemas da unidade localizada no Laboratório de Eficiência Energética I do PPGEN/UFES e da base do leito são apresentados na Figura 1.

Figura 1 – (a) Unidade experimental: 1) leito de jorro, 2) termopar, 3) transdutor de pressão, 4) sistema de aquecimento, 5) soprador; (b) Base cônica do leito.



A unidade experimental possui um soprador centrífugo IBRAM, com vazão máxima de 4,5 m³/min; sistema de aquecimento de ar com controle PID e transdutor de pressão Dwyer que

opera em uma faixa de 0 a 20 IN WC. Para a obtenção dos dados fluidodinâmicas, foram utilizadas partículas de areia de diâmetro de 1,50 mm e massa específica de 2645 Kg/m³ e partículas de casca de cacau de diâmetro de 2,58mm e massa específica de 880 kg/m³.

Avaliou-se a segregação para alturas de leito estático de 6, 8 e 10 cm e fração mássica de biomassa de 0,25; 0,50 e 0,75. As partículas foram mantidas no regime de jorro em uma velocidade 20% maior que a vazão de mínimo jorro por 5 minutos. Em seguida, o soprador foi desligado abruptamente e as guilhotinas foram inseridas. As partículas das amostras contidas em cada região foram separadas por peneiramento, as massas determinadas e o índice de mistura calculado usando a Equação 1.

2.2. Simulação

Inicialmente, foi construída uma malha bidimensional no software *ANSYS ICEM CFD* do tipo estruturada, com eixo de simetria axial. Por meio de sucessivas divisões das células, foram obtidos domínios mais refinados, sendo geradas 3 malhas com 8722, 18802 e 25047 células quadriláteras submetidas ao teste de independência.

Para a modelagem do sistema foi empregada a abordagem Euler-Euler, que trata as diferentes fases como contínuas e interpenetrantes. As equações de conservação de massa e momento são resolvidas para cada fase individualmente, e a esse conjunto são adicionadas equações constitutivas obtidas a partir da teoria cinética granular (Epstein & Grace, 2011). Vários autores mostraram em seus estudos que a abordagem Euler-Euler prediz satisfatoriamente o comportamento de um leito de jorro como Marques (2013) e Santos (2008). O modelo empregado foi o Euleriano granular indicado pelo Guia Teórico do *ANSYS FLUENT*® 15.0 para leitos de jorro.

A força de arraste descreve a transferência de quantidade de movimento entre as fases, e é função do coeficiente de troca de momento. Em sistemas gás-sólido, é considerada uma das forças mais relevantes e a escolha adequada do modelo de arraste é fundamental para o sucesso da aplicação via CFD, possuindo grande influência nos resultados simulados (Marques, 2013; Santos 2011a). Este trabalho utilizou o modelo de Gidaspow et. al (1992). Du et. al (2006a) mostrou que ele é capaz de prever qualitativamente os perfis de porosidade e velocidade das partículas no interior do equipamento. A estratégia de modelagem utilizada neste trabalho é a mesma utilizada por Santos (2011b), onde se pode consultar a descrição detalhadas dos modelos. Por se tratar de uma mistura de partículas, é adicionado o modelo de troca de momento entre as fases granuladas. Foi utilizado o modelo de Syamlal (1987) apud Santos (2010).

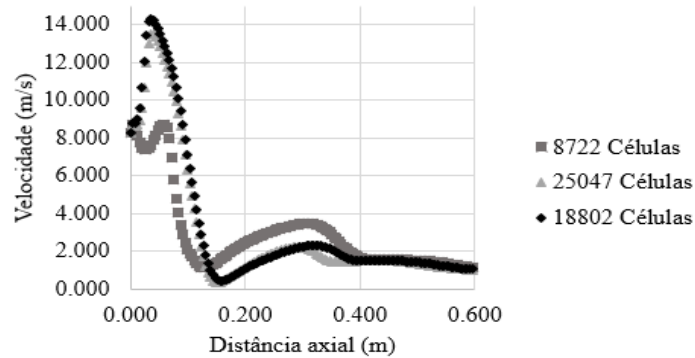
As simulações foram realizadas em regime transiente, o critério de convergência adotado foi de 10⁻³, com passo de tempo de 10⁻⁴ s totalizando 5s em tempo real. O leito foi dividido nas cinco regiões para possibilitar a comparação com os dados experimentais. Após os 5s em tempo real de simulação a velocidade foi zerada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teste de independência da malha foi realizado para a altura de leito estático de 8 cm, fração mássica de cacau de 50% e velocidade de ar de entrada de 8,30 m/s. A velocidade do ar

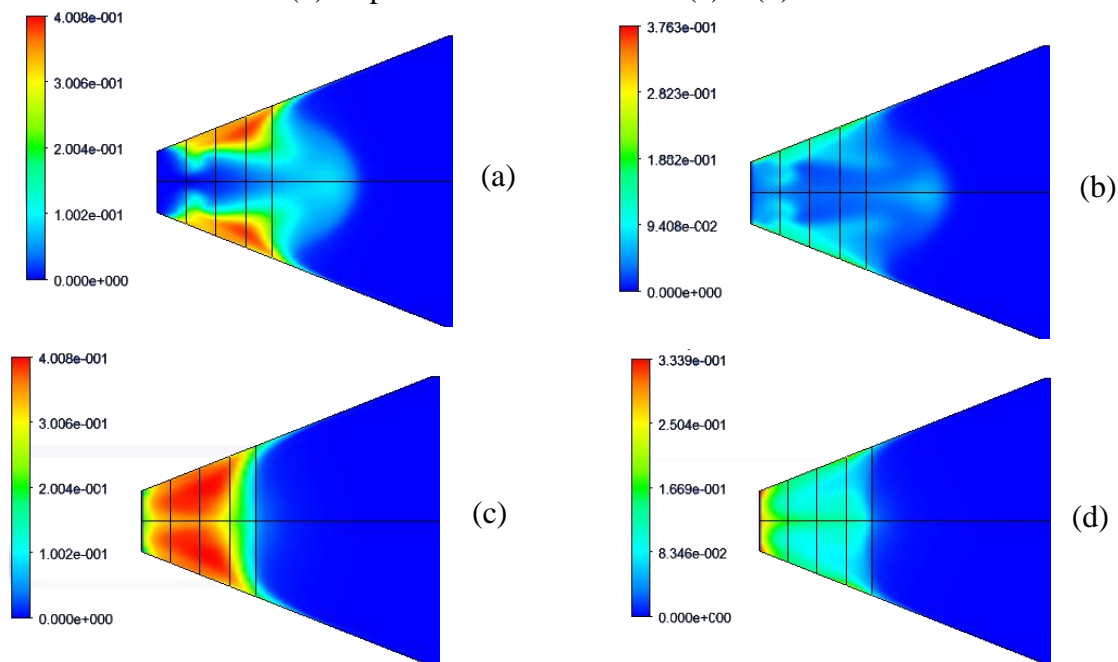
em função da distância axial foi plotada (Figura 2). As malhas de 18802 e 25047 apresentam comportamento semelhante, a primeira foi escolhida para as simulações por apresentar menor esforço computacional e obter resultados semelhantes à malha mais refinada.

Figura 2 – Perfil de velocidade do ar em função da distância axial.



Os perfis de fração volumétrica no regime de jorro e após cortada a vazão de ar de entrada para as partículas de areia e biomassa podem ser visualizados na Figura 3. As regiões de fonte, jorro e anulo podem ser observadas no regime de jorro.

Figura 3 – Frações volumétricas de areia (b) – (d) e biomassa (a) – (c) no regime de jorro (a) – (b) e após corte da vazão de ar (c) – (d).

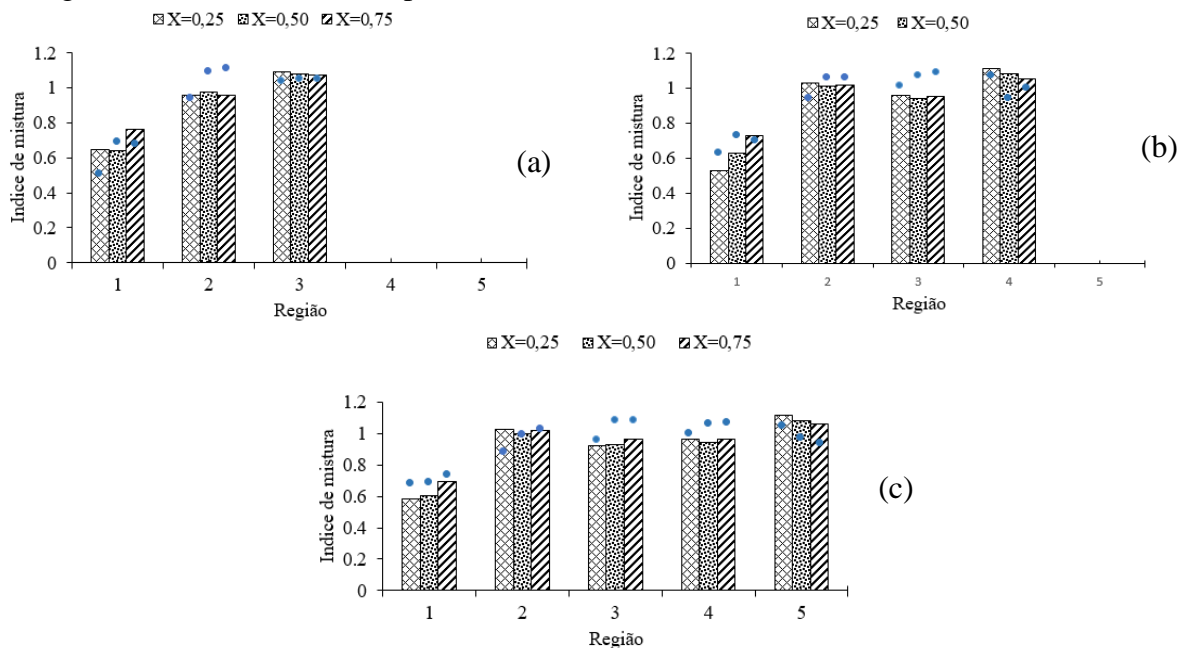


As partículas de biomassa em regime de jorro se concentram na região superior próximo à parede. Nas figuras após o corte de vazão de ar nota-se uma concentração de areia na parte inferior do leito na direção axial, bem como na parte central na direção radial.

Uma análise comparativa dos índices de mistura relacionados às diferentes alturas e frações mássicas de biomassa são apresentados na Figura 4. As barras apresentam os

resultados experimentais, enquanto os pontos azuis os resultados simulados. Observa-se nas figuras que a região superior do leito (região 3 para altura de 6 cm, 4 para altura de 8 cm e 5 para altura de 10 cm) apresenta os índices de mistura mais próximos de um para toda as condições de altura de leito estático e frações mássicas.

Figura 4 – Índice de mistura para altura de leito estático de 6 cm (a); 8cm (b) e 10 cm (c).



Coerente ao observado na Figura 3, os índices de mistura apontam que a segregação é predominante na base do leito (região 1), onde se concentram as partículas de areia, menores e mais densas. Embora as partículas mais densas apresentem uma trajetória menor e caem numa região mais interna da região anular, tendendo a se concentrarem na região superior do leito, as partículas de biomassa por serem fibrosas apresentam dificuldade de escoar e caem próximo à parede, permanecendo próximas a esta na região superior do leito. Comportamento semelhante foi encontrado nos estudos de Santos (2011b). Observa-se que frações mássicas menores apresentam segregação mais evidente na região 1.

Os resultados simulados levam às mesmas conclusões dos experimentais, apresentando boa concordância em praticamente todas as regiões das condições propostas, com um desvio menor ou igual a 10% em quase todos os casos.

4. CONCLUSÃO

Os testes de segregação axial mostram que as partículas menores e mais densas, ou seja, de areia, se concentram na base do leito em todas as condições de altura e fração mássica estudadas. Essa região de maior segregação pôde ser visualizada nos perfis de fração volumétrica simulados que também sugerem que radialmente as partículas maiores e menos densas, de biomassa, se concentram próximo à parede do equipamento. Os resultados simulados, no geral, apresentam boa concordância com os ensaios experimentais, conduzindo às mesmas conclusões.

O estudo mostra que a segregação é consideravelmente baixa nas condições estudadas, o que é apropriado para o processo de pirólise, uma vez que o grau de mistura elevado favorece as taxas de transferência de calor e de massa.

REFERÊNCIAS

- ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, 2013.
- DU, W. et al. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Assessment of drag coefficient correlations. *Chemical Engineering Science*, [s.l.], v. 61, n. 5, p.1401-1420, mar. 2006a. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2005.08.013>.
- EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. Spouted and spout-fluid beds: fundamentals and applications. Cambridge University Press, New York, 2011.
- GIDASPOW, D.; BEZBURUAH, R.; DING, J. Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach. In: Fluidization, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization. p. 75–82, 1992.
- GÓMEZ, E. O. Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão. 2002. 369 f. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, 2002.
- MARQUES, I. I. D. R. Investigação do leito de jorro como reator em potencial de pirólise de partículas cartonadas. 2013. 84 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2013.
- REN, B. et al. Investigation of mixing behaviors in a spouted bed with different density particles using discrete element method. *Powder Technology*, [s.l.], v. 222, p.85-94, maio 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2012.02.003>.
- SANTOS, D. A. Contribuições ao estudo da fluidodinâmica em leito de jorro- Estudos experimentais e de simulação via CFD. 2011. 106 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011a.
- SANTOS, K. G. ; MURATA, V. V. ; BARROZO, M. A. S. . Estudo de fluidodinâmica computacional de um leito de jorro cônico com mistura binária de esferas de vidro. In: XXXI Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionales em la Ingeniería, 2010, Buenos aires. Mecánica Computacional, 2010. v. XXIX. p. 3359-3370.
- SANTOS, K. G. Aspectos fundamentais da pirólise de biomassa em leito de jorro: fluidodinâmica e cinética do processo. 2011. 235 f. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011b.
- SANTOS, K. G. Estudo da fluidodinâmica do leito de jorro por CFD com malhas tridimensionais. 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- SANTOS, K. G. et al. Fluid Dynamics of a Sand-Biomass Mixture in a Spouted-Bed Reactor for Fast Pyrolysis. *Chemical Engineering & Technology*, [s.l.], v. 36, n. 12, p.2148-2154, 31 out. 2013. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/ceat.201300356>.