

## **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE LEITOS FLUIDIZADOS COM DIFERENTES TIPOS DE SÓLIDO PARTICULADO**

**Amanda S. NAGATA<sup>1</sup>; João L. S. JÚNIOR<sup>2</sup>; Rejane B.SANTOS<sup>3</sup>**

### **RESUMO**

Neste trabalho, realizou-se simulações numéricas usando a Fluidodinâmica Computacional (CFD). O escoamento em leitos fluidizados gás-sólido com diferentes partículas sólidas foi avaliado. O pacote computacional gratuito OpenFOAM foi usado. Quatro casos foram estudados para o entendimento dos diferentes padrões de fluidização. Dentre os casos estudados, as simulações apresentaram bons resultados mostrando as características esperadas para cada tipo de particulado.

### **INTRODUÇÃO**

Diversas operações unitárias da Engenharia Química envolvem o transporte de sólidos particulado, os quais podem ser parte integrante do material a ser processado, ou podem estar envolvidos em processos de separação sólido-fluido. Em todos estes casos, o princípio físico fundamental é a transferência da quantidade de movimento entre a fase particulada e a fase fluida (FOUST *et al.*, 1982). Para o melhor entendimento e a otimização destas operações, bem como, dos equipamentos envolvidos, a compreensão dos padrões fluidodinâmicos é de fundamental importância.

Dentre os diversos equipamentos de transporte de particulado, os leitos fluidizados são amplamente empregados tanto em processos físicos (por exemplo, troca térmica, secagem de sólidos, adsorção), como em processos químicos, como craqueamento catalítico (FCC), gaseificação de carvão, entre outros (Kunii e Levenspiel, 1991). O fenômeno onde as partículas sólidas se comportam como um

<sup>1</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre/MG - E-mail: [satieamanda@gmail.com](mailto:satieamanda@gmail.com)

<sup>2</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre/MG. E-mail: [joao.lameu@ifsulde Minas.edu.br](mailto:joao.lameu@ifsulde Minas.edu.br)

<sup>3</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre/MG. E-mail: [rejane.santos@ifsulde Minas.edu.br](mailto:rejane.santos@ifsulde Minas.edu.br)

fluido, através da suspensão destas por um gás ou um líquido é chamada de fluidização. Devido a dinâmica inerente a cada uma das fases fluidas envolvidas, um aumento na taxa de escoamento do fluido resultará em diferentes comportamentos do sistema fluidizado. A fluidização pode ser homogênea (normalmente em sistemas líquido-sólido) e heterogênea (leitos gás-sólido).

Na fluidização homogênea, o sistema apresenta uma expansão progressiva e suave do leito, e o sólido particulado fica distribuído de maneira uniforme pelo leito. Já na fluidização heterogênea, comportamentos mais complexos são observados. Em altas vazões de gás, grandes recirculações de aglomerados de partículas são observadas, gerando distribuições não uniformes. Nestas condições os leitos são conhecidos como agregativos ou borbulhantes. Geldart (1973) identificou quatro grupos de partículas, conforme seus comportamentos de fluidização (Kunii e Levenspiel, 1991): *Grupo A* – partículas que sofrem aeração facilmente, usualmente materiais de pequenos diâmetros e baixa massa específica ( $\rho < 1,4\text{g/cm}^3$ ). Um exemplo destas partículas são os catalisadores de FCC. *Grupo B* – partículas similares a areia, sendo a maior parte dos particulados com diâmetro entre  $40\mu\text{m}$  e  $500\mu\text{m}$ , e massa específica entre  $1,4 - 4,0\text{g/cm}^3$ . A fluidização é do tipo borbulhante, e areia é o principal exemplo. *Grupo C* – partículas coesivas e pós muito finos e aderentes. A fluidização normal é difícil e canais preferenciais de escoamento do fluido são formados. Farinha e amido são exemplos. *Grupo D* – partículas grandes e densas, o comportamento destas partículas é difícil de ser previsto, podem ocorrer a formação de bolhas, formação de canais, e até mesmo a formação de jorros em casos de aeração não-uniforme. Grãos de arroz e de milho são exemplos.

A técnica Fluidodinâmica Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) tem se mostrado uma importante ferramenta no estudo do escoamento de diversos tipos de sistemas e em diversas áreas da engenharia. Esta pode ser definida como a área da ciência que estuda os fenômenos físicos que governam o escoamento dos fluidos aplicando técnicas numéricas e recursos computacionais. O uso de pacotes abertos e gratuitos como o OpenFOAM é uma interessante alternativa para estudos acadêmicos.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Para a realização desta pesquisa na área de simulações numéricas, o computador usado foi um notebook Dell Inspiron 14-2640, com processador Intel

Core i5 de 2,4GHz. 6GB de memória RAM e 1TB de disco rígido, com sistema operacional Linux Ubuntu 14.04 de 64 bits.

A técnica Fluidodinâmica Computacional (CFD) foi usada neste trabalho, usando o pacote aberto e gratuito OpenFOAM da ESI Group, que tem como base o Método dos Volumes Finitos para solução numérica dos casos de estudo. Além disso, o pós-processador Paraview da Kitware foi usado na visualização dos resultados. De modo geral a metodologia de trabalho pode ser resumida em 3 etapas: 1 – Definição do caso de estudo (criação da geometria e da malha numérica); 2 – Solução da simulação (aplicação do solver, acompanhamento da convergência numérica da solução); 3 – Obtenção e visualização e interpretação dos resultados obtidos.

Esta pesquisa encontra-se em estágio inicial, e nesta fase, quatro casos de estudo foram definidos com objetivo de se entender melhor o escoamento fluidizado, a técnica CFD, além da familiarização com os softwares empregados. Dentre os casos estudados, leitos com partículas de cada grupo da classificação de Geldart foram simulados, e as condições empregadas nas simulações são mostradas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Condições operacionais dos casos de estudo.

<b>Caso</b>	<b>Diâmetro da Partícula (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Massa Específica da Partícula (<math>\text{kg}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Exemplo de Partícula</b>	<b>Velocidade do Gás (<math>\text{m}/\text{s}</math>)*</b>
<b>A</b>	75	1400	Catalisador FCC	0,125
<b>B</b>	300	2500	Areia média	0,125
<b>C</b>	5	600	Farinha de Trigo	0,125
<b>D</b>	1500	1300	Carvão	1,000

\* Definida como uma velocidade acima da velocidade mínima de fluidização da partícula.

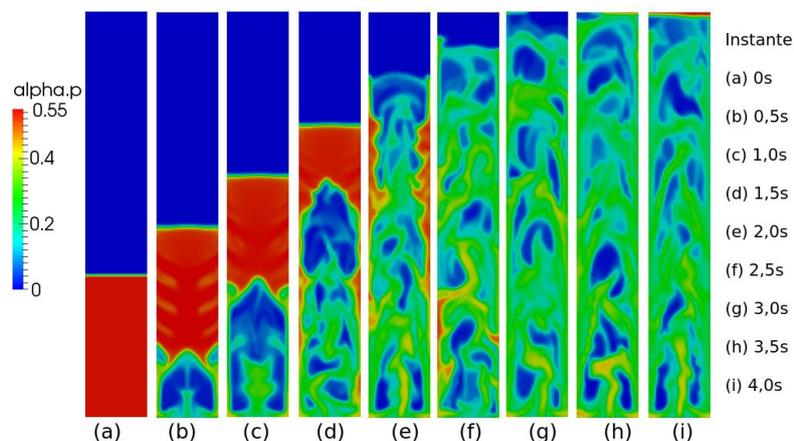
Para solução das simulações o *solver twoPhaseEulerFoam* disponível no OpenFOAM foi empregado (OPENFOAM, 2014). Este resolve os balanços de massa, quantidade de movimento e calor, para ambas as fases, gás e sólida, dentro da abordagem Euleriana, bem como, considera características do escoamento granular, do arraste fluido-partícula e de turbulência. Para cada caso de estudo, 4s de simulação transiente foram resolvidos, com um passo de tempo de 0,0002s. O leito em estudo é uma coluna retangular de dimensões 0,15m x 1m x 0,1m (largura x

altura x profundidade). A malha numérica usada nas simulações consiste em 6000 elementos hexaédricos, sendo gerada pelo próprio OpenFOAM. Como condição inicial, um leito estático de partículas com altura de 0,35m, e empacotamento de 0,55 foi considerado em todos os casos de estudo, já como condição de contorno, têm-se na entrada injeção apenas de gás, na velocidade específica de cada caso, nas paredes a condição de não-deslizamento da fase gás e deslizamento livre para as partículas e a saída é aberta para a pressão atmosférica.

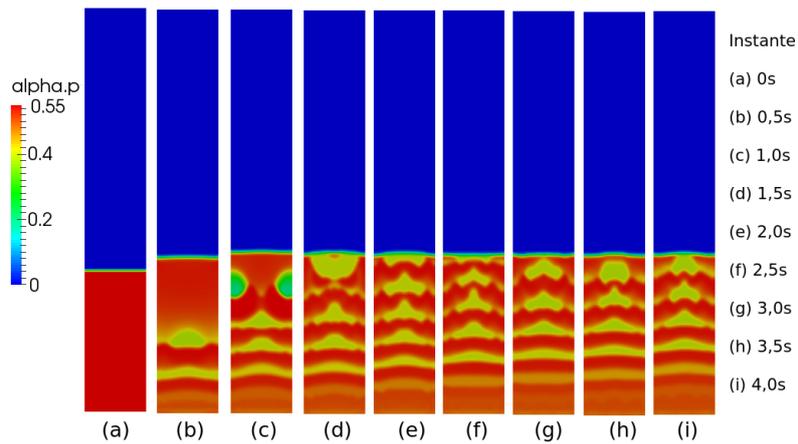
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 1-4 apresentam a evolução dos campos instantâneos de fração volumétrica das partículas sólidas ( $\alpha.p$ ) a cada 0,5s de simulação para os casos estudados. Na simulação do caso A (Figura 1), foi visto que, devido ao pequeno tamanho das partículas e a baixa massa específica, o leito apresentou grande expansão resultando em uma distribuição heterogênea das partículas por todo o leito. Devido a velocidade de fluidização relativamente alta, observou-se o aparecimento do regime de fluidização borbulhante (regiões em azul representam as bolhas de gás formadas).

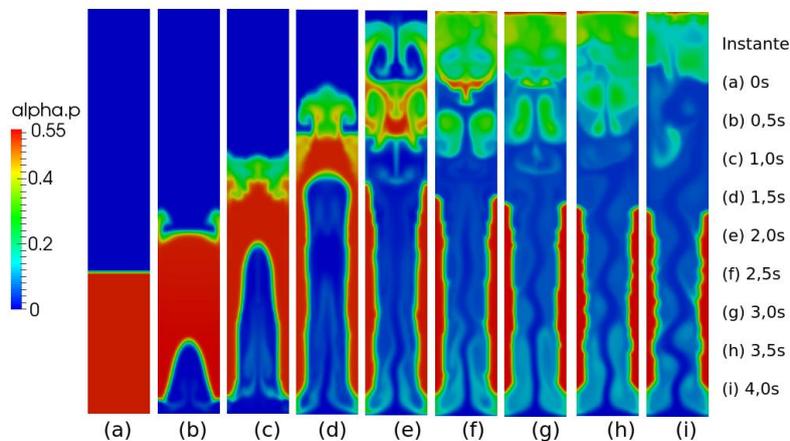
Para as partículas da classe B (Figura 2), notou-se uma tendência a formação periódica de regiões menos densas em partículas, no entanto, bolhas de gás não foram observadas. Isto pode ser justificado pelo maior diâmetro destas partículas e pela velocidade de fluidização simulada, onde os vazios entre partículas permitiram a passagem do gás sem a formação das regiões de agregados de partículas e conseqüentemente formação das bolhas.



**Figura 1.** Evolução dos campos de fração volumétrica das partículas sólidas: Caso A.



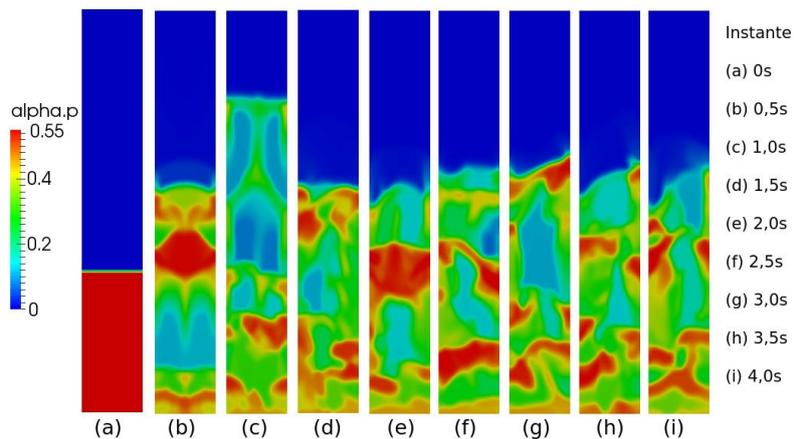
**Figura 2.** Evolução dos campos de fração volumétrica das partículas sólidas: Caso B.



**Figura 3.** Evolução dos campos de fração volumétrica das partículas sólidas: Caso C.

Para o caso C (Figura 3), onde as partículas muito finas e coesivas estão presentes, observou-se a formação inicial de um grande *slug* (região contínua de ar) no leito, o qual arrastou as partículas até aproximadamente 2s de simulação, momento onde o *slug* se rompeu, resultando em um canal preferencial de escoamento do gás na região central da geometria estudada. Destaca-se também, que devido à baixa massa específica das partículas, grande parte foi arrastada para fora do domínio computacional devido ao arraste pelo ar.

Na simulação do caso D (Figura 4), onde grandes partículas estão presentes, o comportamento do leito de jorro foi capturado, o qual é caracterizado pela expansão de agregados de partículas (por exemplo, na Figura 4 (c), (g)), as quais retornam de volta ao leito (por exemplo, na Figura 4 (e), (f)). Para a velocidade de fluidização simulada para o caso D, o leito demonstrou tendência a formação do regime de fluidização borbulhante.



**Figura 4.** Evolução dos campos de fração volumétrica das partículas sólidas: Caso D.

## CONCLUSÕES

Simulações iniciais de sistemas multifásicos foram realizadas. Devido à grande complexidade inerente ao sistema estudado e a técnica computacional empregada, etapas específicas ainda serão realizadas no desenvolvimento desta pesquisa (entendimento aprofundado do método numérico empregado na solução; fenômenos de turbulência em escoamentos; interação entre as fases, etc.).

Pelos resultados apresentados, conclui-se que a técnica CFD é uma boa ferramenta para o entendimento e o desenvolvimento de processos e operações envolvendo o escoamento de fluidos e partículas. Para os casos simulados, os resultados obtidos apresentaram boa concordância com a física real esperada, e os comportamentos de leitos fluidizados contendo partículas das classes A, B, C e D da classificação de Geldart foram observados.

## REFERÊNCIAS

FOUST, A; S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das operações unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

GELDART, D. Types of gas fluidization. **Powder Technology**, vol. 7, p. 285-292, 1973.

KUNII, D; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2nd. edition. Butterworth-Heinemann, Boston, MA, USA, 1991.

**OPENFOAM User Guide**: The Open Source CFD Toolbox, versão 2.3.1, OpenFOAM Foundation, 2014.