

# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-SÓLIDOS NO TUBO ASCENDENTE DE UM LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE – INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE DA FASE SÓLIDA

**Luben Cabezas Gómez** – e-mail: [lubencg@sc.usp.br](mailto:lubencg@sc.usp.br)

**Fernando Eduardo Milioli** – e-mail: [milioli@sc.usp.br](mailto:milioli@sc.usp.br)

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos, Escola de Engenharia de São Carlos, USP. Av. Trabalhador São-carlense, N° 400-Centro, São Carlos, SP. CEP 13566-590.

**Resumo.** *Desenvolve-se modelagem matemática e simulação numérica para o escoamento bifásico gás-sólidos na coluna ascendente de um leito fluidizado circulante usando o modelo das duas fases separadas. Dois métodos para o tratamento da viscosidade da fase sólida são considerados. Simulação numérica é executada para o estudo do efeito da viscosidade da fase sólida sobre a hidrodinâmica do escoamento. Validação é efetivada pela comparação dos resultados de simulação com dados experimentais.*

**Palavras-chave:** *modelo das duas fases, simulação numérica, escoamentos bifásicos gás-sólidos, leito fluidizado circulante, viscosidade do sólido.*

## 1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho desenvolve-se modelagem matemática e simulação numérica para o escoamento bifásico gás-sólidos na coluna ascendente de um leito fluidizado circulante usando o modelo das duas fases separadas (formulação Euleriana para ambas as fases). Esta linha de modelagem apresenta alguns aspectos problemáticos especialmente quando aplicada a escoamentos gás-sólidos. Entre estes estão as instabilidades físicas do escoamento, instabilidades introduzidas por procedimentos numéricos, a formulação de condições de contorno, e o tratamento de parâmetros físicos como a pressão e a viscosidade da fase sólida. Nesse trabalho apresenta-se um estudo do efeito da viscosidade da fase sólida sobre a hidrodinâmica do escoamento.

O desenvolvimento do modelo das duas fases separadas aplicado a escoamentos gás-sólidos, bem como da metodologia numérica utilizada são detalhados em Cabezas (1999) e Cabezas e Milioli (1999). Apresenta-se a seguir uma breve descrição destes desenvolvimentos.

## 2. FORMULAÇÃO E PROCEDIMENTO NUMÉRICO

O modelo é formulado considerando cada fase em separado, em termos de um sistema de equações de conservação de massa e quantidade de movimento para cada fase respectivamente. As equações de campo apresentam termos de interação interfásicos que especificam o transporte de massa e quantidade de movimento através da interface entre as fases. A formulação do modelo das duas fases é desenvolvida pelo procedimento mostrado na Fig. 1 (Enwald *et al.* 1996).

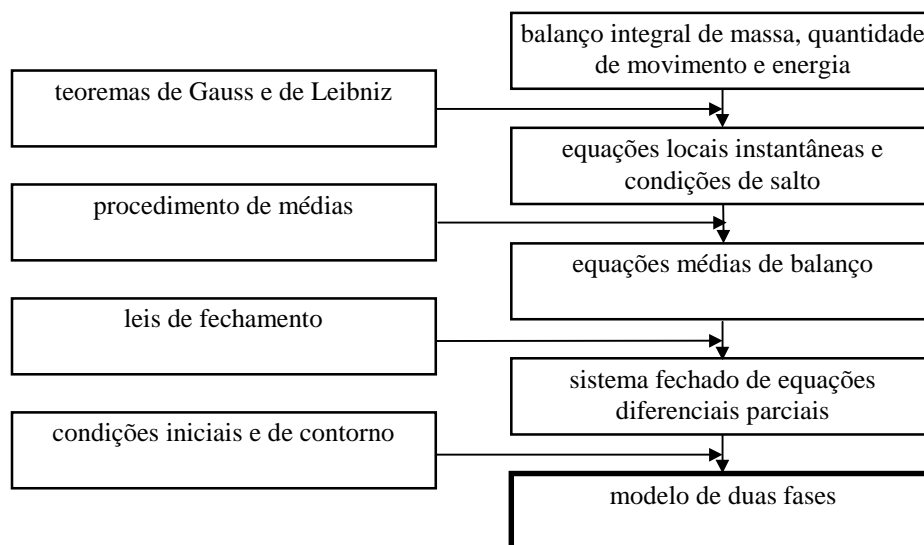


Figura 1 – Procedimento geral para a formulação do modelo de duas fases (Enwald *et al.*, 1996).

Da aplicação do procedimento descrito na Fig. 1 resulta a formulação clássica do modelo das duas fases separadas. As principais hipóteses simplificativas assumidas na obtenção do modelo são: escoamento bifásico não reativo sem transferência de massa na interface; escoamento laminar e isotérmico para ambas as fases, as quais são consideradas meios contínuos; particulado homogêneo caracterizado por apenas um diâmetro médio de partícula  $d_p$  (m); e finalmente consideram-se as fases como fluidos Newtonianos. Uma formulação modificada, denominada modelo B, é usada pelo grupo de pesquisa do IIT/ANL (Illinois Institute of Technology/Argonne National Laboratory) (Gidaspow, 1994). Nesta formulação considera-se todo o gradiente da pressão termodinâmica  $P$  apenas na fase gasosa e o termo de transferência de quantidade de movimento na interface é modificado considerando o princípio de Arquimedes e a relação usual de mínima fluidização apresentada em Kunii & Levenspiel (1961). O grupo do IIT/ANL considera que o modelo B torna o sistema de equações diferenciais parciais num problema matemático bem posto.

A seguir apresenta-se a formulação do modelo B assumida nesse trabalho.

$$\frac{\partial(\rho_g \cdot \alpha_g)}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho_g \alpha_g \bar{U}_g) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_s \cdot \alpha_s)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_s \alpha_s \vec{U}_s) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_g \alpha_g \vec{U}_g)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_g \alpha_g \vec{U}_g \vec{U}_g) = \vec{\nabla} P - \beta(\vec{U}_g - \vec{U}_s) + \vec{\nabla} \cdot (\alpha_g \bar{\tau}_g) + \rho_g \vec{g} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho_s \alpha_s \vec{U}_s)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_s \alpha_s \vec{U}_s \vec{U}_s) = \beta(\vec{U}_g - \vec{U}_s) - G(\alpha_g) \vec{\nabla} \alpha_s + \vec{\nabla} \cdot (\alpha_s \bar{\tau}_s) + (\rho_s - \rho_g) \alpha_s \vec{g} \quad (4)$$

onde

$$\beta = 150 \frac{\alpha_s^2 \mu_g}{(\alpha_g d_p \phi_s)^2} + 1.75 \frac{\rho_g \alpha_s |\vec{U}_g - \vec{U}_s|}{(\alpha_g d_p \phi_s)} \quad 0,2 \leq \alpha_g < 0,8 \quad (5)$$

$$\beta = \frac{3}{4} C_{Ds} \frac{\rho_g \alpha_s |\vec{U}_g - \vec{U}_s|}{(d_p \phi_s)} \alpha_g^{-2,65} \quad \alpha_g \geq 0,8 \quad (6)$$

$$C_{Ds} = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}_p} (1 + 0.15 \cdot \text{Re}_p^{0,687}) & \text{Re}_p < 1000 \\ 0,44 & \text{Re}_p \geq 1000 \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{Re}_p = \frac{|\vec{U}_g - \vec{U}_s| d_p \rho_g \alpha_g}{\mu_g} \quad (8)$$

$$G(\alpha_g) = \frac{\partial P_s}{\partial \alpha_s} = 10^{-8,76\alpha_g + 5,43} \frac{N}{m^2} \quad (9)$$

$$\bar{\tau}_k = \mu_k \left[ \vec{\nabla} \vec{U}_k + (\vec{\nabla} \vec{U}_k)^T - \frac{2}{3} (\vec{\nabla} \cdot \vec{U}_k) \bar{\mathbf{I}} \right] \quad (10)$$

$$\rho_g = \frac{P}{R_g T} \quad (11)$$

$$\rho_s = \text{const} \quad (12)$$

$$\alpha_s = 1 - \alpha_g \quad (13)$$

Nas equações anteriores  $U_g$ ,  $U_s$ ,  $\rho_g$ , e  $\rho_s$  são as velocidades médias (m/s) e as densidades do gás e do sólido ( $\text{kg/m}^3$ ) respetivamente;  $\alpha_g$  é a fração de vazio e  $\alpha_s$  é a fração volumétrica da fase sólida;  $P$  é a pressão termodinâmica ou pressão do gás (Pa). O tensor das tensões viscosas para o gás e o sólido é representado por  $\tau_g$  e  $\tau_s$ , (Pa), respectivamente.  $g$  representa a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ),  $G$  o módulo de elasticidade do sólido ( $\text{N/m}^2$ ) e  $\beta$  a função de arrasto na interface ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ).  $C_{Ds}$  caracteriza o coeficiente de arrasto para uma partícula num meio infinito,  $Re_p$  o número adimensional de Reynolds com base em  $d_p$ , e  $\phi_s$  a esfericidade da

partícula. Na Eq.(10)  $\mu_k$  significa a viscosidade dinâmica de ambas as fases (Pa.s), onde  $k$  representa o índice da fase. Finalmente  $R_g$  é a constante dos gases ideais para o ar (kJ/kgK), e  $t$  é o tempo (s).

Na determinação do coeficiente de viscosidade dinâmica da fase sólida,  $\mu_s$ , utilizam-se dois procedimentos gerais (Kuipers & van Swaaij, 1997).

1. A viscosidade do sólido é calculada considerando a fase sólida como um fluido Newtoniano, assumindo ainda  $\mu_s = \text{constante}$ .
2. A viscosidade do sólido é calculada explicitamente a partir da teoria cinética dos escoamentos granulares (TCEG).

No primeiro procedimento a viscosidade da fase sólida é calculada a partir de dados experimentais. Utilizando a equação de conservação da quantidade de movimento para a mistura na direção axial, integrada na seção transversal, Tsuo (1989) e Tsuo & Gidaspow (1990) obtiveram a seguinte equação, utilizada para a determinação de  $\mu_s$

$$-\mu_s \frac{\partial V_s}{\partial r} = \frac{R_w}{2} \left( -\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{2}{R_w^2} \int_0^{R_w} \alpha_s \rho_s r dr - \frac{2}{R_w^2} \int_0^{R_w} \frac{\partial(\alpha_s \rho_s V_s^2)}{\partial z} r dr \right) \quad (14)$$

onde  $R_w$  é o raio interno do leito circulante. A metodologia de cálculo assim como a instalação experimental são mostrados detalhadamente no trabalho de Miller & Gidaspow (1992).

Nesse procedimento os efeitos de turbulência da fase sólida são desprezados. A desvantagem deste método é que dados experimentais são necessários para a determinação de  $\mu_s$ .

No segundo procedimento o valor de  $\mu_s$  é calculado diretamente da TCEG. Existem na literatura várias formulações da viscosidade dinâmica da fase sólida  $\mu_s$  utilizando a TCEG. Todas as formulações baseiam-se na composição dos efeitos cinéticos e de colisão entre as partículas. Boemer *et al.* (1995) apresentam um resumo de diferentes formulações na TCEG. Gidaspow (1994) apresenta detalhadamente o cálculo de  $\mu_s$  através da TCEG.

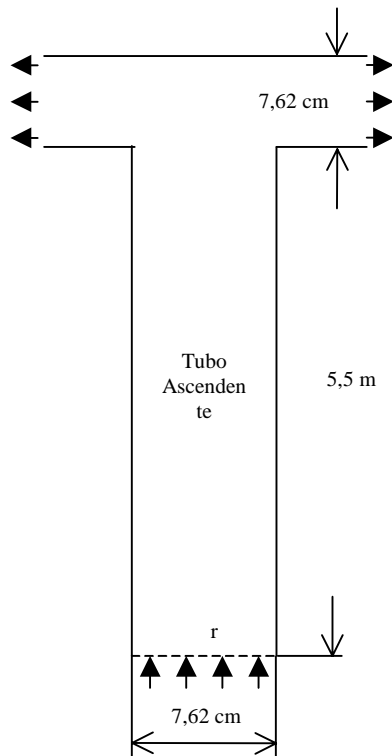
O segundo procedimento é mais complexo que o primeiro e requer mais tempo de computação. No presente trabalho considera-se o primeiro procedimento para o cálculo de  $\mu_s$ .

Os detalhes da metodologia numérica e da técnica de solução são expostos em Cabezas (1999) e em Cabezas e Milioli (1999). Utiliza-se o código computacional MULTIFIX modificado (Syamlal, 1985) seguindo o procedimento de Tsuo (1989) e introduzindo os procedimentos propostos por Ding (1990) para calcular o tensor das tensões viscosas para as fases gasosa e sólida respectivamente. As equações do modelo hidrodinâmico são discretizadas em diferenças finitas de acordo com o método numérico de solução implícita de problemas multifásicos proposto por Harlow & Amsden (1975). Os cálculos são desenvolvidos usando uma malha computacional composta de células fixas num espaço bidimensional (malha Euleriana). As variáveis escalares são localizadas no centro da célula computacional e as variáveis vetoriais nas fronteiras.

### 3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM LEITO CIRCULANTE

A Fig. 2 mostra a geometria e as condições de iniciais e de contorno consideradas. Resultados de simulação são obtidos para valores constantes da viscosidade da fase sólida,  $\mu_s = 0,25, 0,509, 0,75$  e  $1,0 \text{ kg/(ms)}$ . Estes valores foram escolhidos arbitrariamente em torno do valor experimental médio,  $\mu_s = 0,509 \text{ kg/(ms)}$ , calculado por Tsuo (1989) através da Eq. (14), para mostrar a influência qualitativa de  $\mu_s$  nos resultados. Os resultados obtidos para o

escoamento invíscido não são apresentados, devido à não convergência do programa computacional para este caso particular.



Dados da simulação:

Diâmetro das partículas:  $d_p = 520 \mu\text{m}$   
 Densidade do sólido:  $\rho_s = 2620 \text{kg/m}^3$   
 Velocidade mássica do sólido:  $G_s = 24,9 \text{kg}/(\text{sm}^2)$

Condições iniciais:

Tubo ascendente sem sólido  
 $P = 101,325 \text{ kPa}$   
 $T = 300 \text{ K}$

Condições de contorno na entrada:

$v_s = 0,386 \text{ m/s}$   
 $v_g = 4,979 \text{ m/s}$   
 $\alpha_s = 0,0246$   
 $P = 121,590 \text{ kPa}$   
 $T = 300 \text{ K}$

Condições de contorno na saída:

Condição de continuidade

$$\frac{\partial f}{\partial z} = 0 \quad (15)$$

onde  $f$  pode ser  $\alpha_g$ ,  $u_g$  ou  $u_s$   
 Pressão fixa:  $P = 101,325 \text{ kPa}$

Condições computacionais:

$\delta r = 0,381 \text{ cm}$   
 $\delta z = 7,62 \text{ cm}$   
 $\delta t = 0,0005 \text{ s}$   
 Número de nós:  $(12 \times 75) = 900$   
 Tempo real de cálculo  $t = 48 \text{ s}$

Figura 2 – Geometria e condições iniciais e de contorno usadas na simulação do sistema de transporte do IIT apresentado em Luo (1987) e em Tsuo (1989).

A Fig. 3 mostra os contornos de fração volumétrica de sólidos no tubo ascendente para  $\mu_s = 0,509 \text{ kg}/(\text{ms})$  (tons de cinza menos intensos indicam maior fração volumétrica de sólidos). Observa-se a formação e dissipação de aglomerados de forma qualitativamente semelhantes às observações de Tsuo (1989), que modelou essa mesma instalação utilizando coordenadas cartesianas.

Na Fig. 4 apresenta-se a variação temporal da velocidade mássica da fase sólida,  $G_s$ , ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ) em função de  $\mu_s$ , aos 5,3 metros de altura. Este valor é obtido por integração sobre toda a área transversal do leito nesta altura. Como observa-se a variação da velocidade mássica não é muito influenciada pelo valor da viscosidade do sólido, e os resultados de simulação apresentam boa concordância com o valor médio experimental obtido por Luo (1987) independentemente do valor de  $\mu_s$ . Nota-se que no intervalo de tempo considerado não existe uma tendência ao estabelecimento de um regime estacionário bem definido, a exemplo do que ocorre na prática. Observam-se oscilações de baixa frequência características de leitos circulantes (cerca de 0,2 Hertz) como reportado na literatura (Tsuo, 1989).

No entanto, quando compara-se os perfis da velocidade axial nota-se um maior efeito do valor da viscosidade do sólido. Na Fig. 5 mostra-se uma comparação dos perfis simulados e experimentais da variação radial da velocidade axial local para ambas as fases em função do valor da viscosidade do sólido. Esses valores das velocidades são médios no tempo e foram integrados no intervalo de tempo de 10 a 48 segundos em todos os casos, com exceção do perfil correspondente a  $\mu_s = 0,509 \text{ kg}/(\text{ms})$  para o qual o intervalo de integração temporal vai de 10 à 40 segundos de simulação (devido a problemas de convergência para  $t > 40$  segundos). Observam-se grandes desvios (até aproximadamente 60 %) no comportamento dos

perfis de velocidade em função de  $\mu_s$ . Pode-se notar uma tendência de achatamento dos perfis de velocidades com o aumento da viscosidade do sólido. Esse efeito não parece ser apenas uma consequência do método numérico já que para o valor  $\mu_s = 0,75 \text{ kg/(ms)}$  o perfil apresenta um achatamento menor que o esperado no caso de difusão numérica. Para baixos valores de viscosidade,  $\mu_s = 0,25 \text{ kg/(ms)}$ , os resultados são bastante insatisfatórios, notando-se eventualmente uma maior influência da condição de contorno de simetria no centro da coluna. Esta influência da condição de simetria foi discutida em Cabezas e Milioli (1999).

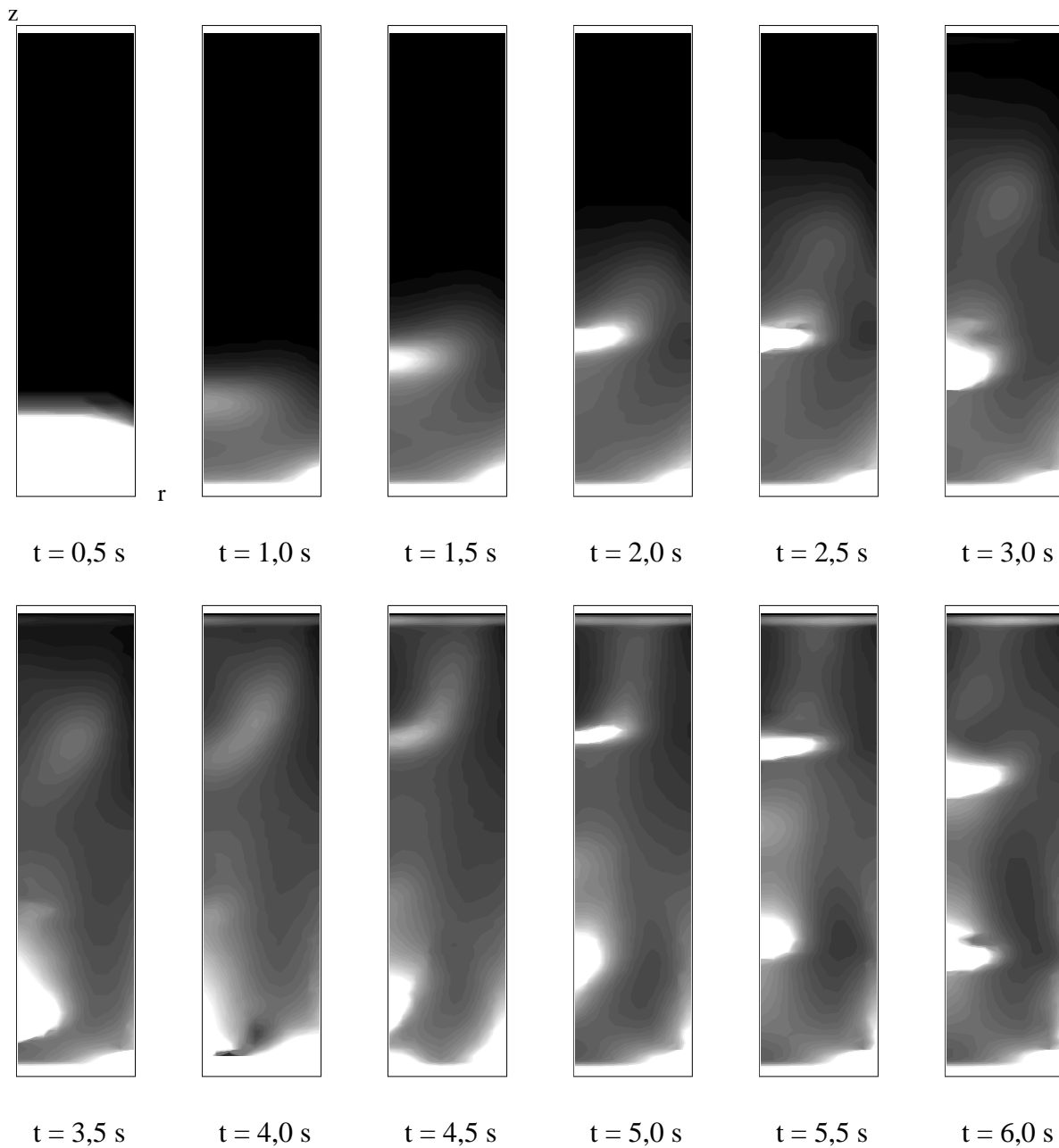


Figura 3 – Perfis do contorno da fração volumétrica de sólidos em função do tempo, para  $\mu_s = 0,509 \text{ kg/(ms)}$ . (tons de cinza menos intensos indicam maior fração volumétrica de sólidos).

Dos resultados apresentados na Fig. 5 pode-se concluir que o valor da viscosidade da fase sólida afeta consideravelmente os resultados de simulação. Uma metodologia que permita um cálculo mais rigoroso desta propriedade deve portanto ser considerada, como é o caso da teoria cinética dos escoamentos granulares (TCEG).

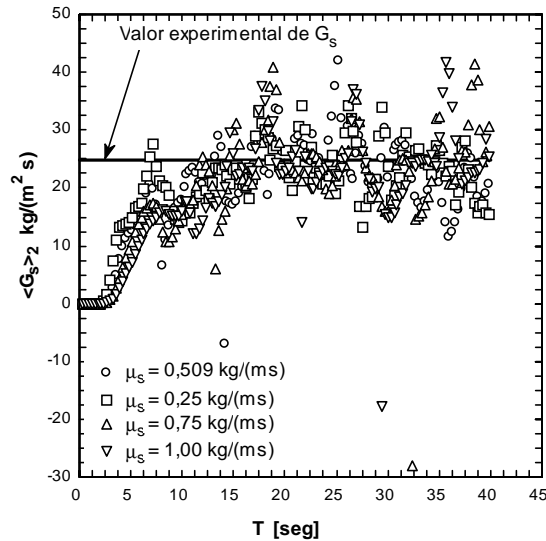


Figura 4 – Velocidade mássica do sólido  $G_s$ , em função do tempo na altura de 5,3 metros. [O valor médio experimental de  $G_s$  é  $24,9 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , (Luo, 1987)].

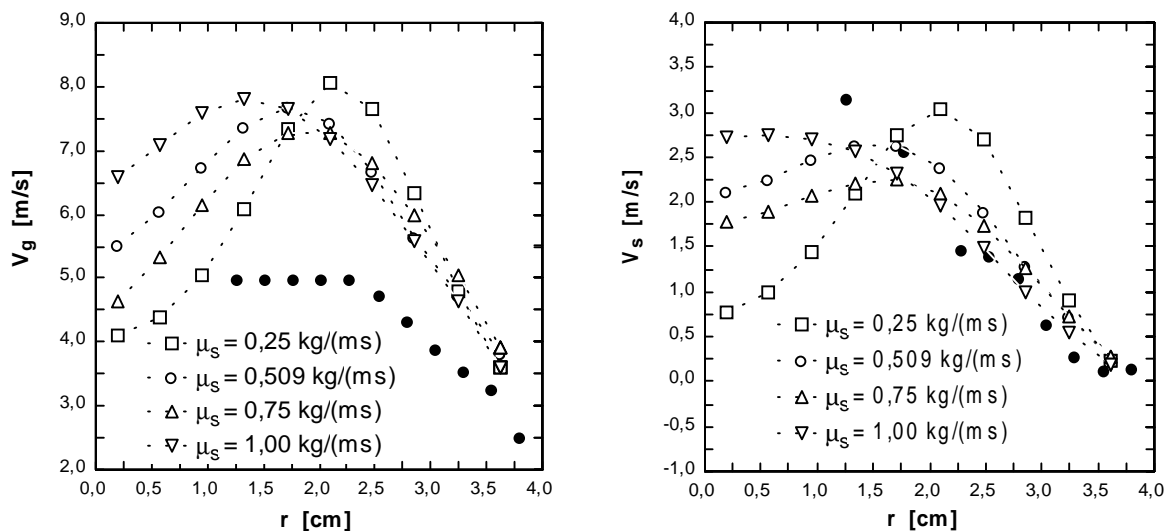


Figura 5 – Velocidade axial local média no tempo na altura de 3,4 metros, para as fases gasosa e sólida, respectivamente. [● experimental (Luo, 1987), simulações para diferentes valores da viscosidade do sólido,  $\mu_s$ ].

#### 4. COMENTÁRIOS FINAIS

A hidrodinâmica do escoamento bifásico gás-sólidos numa coluna de leito circulante é bastante complexa, caracterizando-se por grandes variações radiais e axiais da concentração de sólidos, e pela freqüente formação e dissociação de aglomerados sólidos que escoam de forma ascendente e descendente.

Embora os resultados da velocidade mássica de sólidos apresentem boa concordância com os dados experimentais, o mesmo não ocorre com os perfis de velocidades axiais para ambas as fases. Isto é devido, possivelmente, às simplificações adotadas no modelo assim como às condições de contorno e geometria adotadas na simulação que diferem das condições reais de operação da instalação simulada, particularmente a condição de contorno de simetria no centro da coluna. Além disso agrega-se as incertezas contidas na obtenção dos resultados experimentais apresentados, o que é próprio das medições experimentais em escoamentos multifásicos.

Observa-se claramente a grande influência que tem o valor da viscosidade do sólido sobre o escoamento. Isso aponta para a necessidade de modelar este termo através de uma formulação teórica mais rigorosa que caracterize melhor as interações e fenômenos físicos envolvidos no processo de fluidização gás-sólidos em leitos circulantes. Tal é o caso da TCEG, a ser considerada em trabalhos posteriores a este.

### ***Agradecimentos***

Os autores agradecem à FAPESP (número de processo 98/13812-1) pelo suporte financeiro para realização deste trabalho.

### **REFERÊNCIAS**

- Boemer, A., Qi, H., Renz, U., Vasquez, S., Boysan, F., 1995, Eulerian computation of fluidized hydrodynamics-a comparison of physical models, Proc.13<sup>th</sup> Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, v.2, p.775-787.
- Cabezas, L. C., 1999, Um estudo da modelagem matemática e simulação numérica de escoamentos bifásicos gás-sólidos, Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, Brasil.
- Cabezas, L. G., Milioli, F. E., 1999, Modelagem matemática e simulação numérica do escoamento bifásico gás-sólidos num leito fluidizado circulante, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindoia, SP, Brasil. (CD-Rom).
- Ding, J., 1990, A fluidization model using kinetic theory of granular flow, Ph.D. Thesis, Illinois Institute of Technology, Chicago.
- Enwald, H., Peirano, E., and Almstedt, A.-E., 1996, Eulerian two-phase flow theory applied to fluidization, International Journal of Multiphase Flow, v.22, p.21-66, Supplement.
- Ettahadieh, B., 1982, Hydrodynamic analysis of gas-solids fluidized beds, Ph.D. Thesis, Illinois Institute of Technology, Chicago.
- Gidaspow, D., 1994, Multiphase Flow and Fluidization. Continuum and Kinetic Theory Descriptions, Academic Press, Boston.
- Harlow, F.H. & Amsden, A. A., 1975, Numerical calculations of multiphase fluid flow, Journal of Computational Physics, v.17, p.19-52.
- Kuipers, J.A.M., van Swaaij, W.P.M., 1997, Application of computational fluid dynamics to chemical reaction engineering, Reviews in Chemical Engineering, v.13, n.3.
- Kunii, D., and Levenspiel, O., 1961, "Fluidization Engineering", Butterworth-Heinemann, Boston.
- Luo, K. M., 1987, Dilute, Dense-Phase and Maximum Solids-Gas Transport, Ph.D. Thesis, Illinois Institute of Technology, Chicago.
- Miller, A., Gidaspow, D., 1992, Dense, vertical gas-solid flow in a pipe, AIChE Journal, v.38, n.11, p.1801-1815.



- Syamlal, M., 1985, Multiphase hydrodynamics of gas-solids flow, Ph.D. Thesis, Illinois Institute of Technology, Chicago.
- Tsuo, Y. P., 1989, Computation of flow regimes in circulating fluidized beds, Ph.D. Thesis, Illinois Institute of Technology, Chicago.
- Tsuo, Y.P., Gidasow, D., 1990, Computation of flow patterns in circulating fluidized beds, AIChE Journal, v.36, n.6, p.885-896.

## **NUMERICAL SIMULATION OF THE GAS-SOLIDS TWO-PHASE FLOW IN THE RISER OF A CIRCULATING FLUIDIZED BED – INFLUENCE OF THE SOLID PHASE VISCOSITY**

***Abstract.** Mathematical modelling and numerical simulation are developed for two-phase gas-solids flow through the riser of a circulating fluidized bed using a two-fluids model. Two methods are considered for treating the solids phase viscosity. Simulation is performed aiming to study the effect of the solids phase viscosity over the flow hydrodynamics. Validation is performed by comparing the results of simulations with experimental data.*

***Key-Words:** Two-fluids model, numerical modeling, two-phase gas-solid flow, circulating fluidized bed, solid viscosity.*