



MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO BIFÁSICO GÁS-SÓLIDOS NUM LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

Luben Cabezas Gómez

Fernando Eduardo Milioli

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos, Escola de Engenharia de São Carlos, USP. Av. Dr. Carlos Botelho, N° 1465, São Carlos, SP. CEP 13560-250.

***Resumo.** Apresenta-se um estudo inicial de modelagem matemática e simulação numérica de escoamentos bifásicos gás-sólidos aplicada a processos de fluidização, particularmente a leitos circulantes. São descritas brevemente a formulação teórica do modelo das duas fases e a metodologia numérica usada para solução deste modelo. Finalmente são apresentados resultados de simulação numérica de leitos circulantes.*

***Palavras-chave:** modelo das duas fases, modelagem numérica, escoamentos bifásicos gás-sólidos, leitos circulantes.*

1. INTRODUÇÃO

A fluidização gás-sólidos tem variadas aplicações industriais entre as quais incluem-se as indústrias do petróleo, química, metalúrgica e de geração de energia. Reatores de leito fluidizado são amplamente utilizados na combustão de carvão para geração termelétrica de energia em larga escala, e no craqueamento catalítico do petróleo para a produção de gasolina e outros derivados.

Os combustores de leito circulante têm emergido como uma opção promissora para a geração de energia em caldeiras de queima de carvão e de gasificação de biomassa. Existem muitas vantagens na utilização destes combustores, tais como: a flexibilidade no combustível, a grande eficiência da combustão, a ampla faixa de carga, as baixas emissões de óxidos de nitrogênio e enxofre NO_x e SO_2 , e a boa taxa de recirculação do material no tubo ascendente. O leito circulante denomina-se a segunda geração de combustores de leito fluidizado (Tsuo, 1989).

No entanto, a tecnologia de fluidização gás-sólidos apresenta ainda problemas a serem resolvidos, tais como: a forte erosão das superfícies internas ao leito, dos tubos de troca de calor, etc., assim como a possível bloqueio das partículas finas no tubo ascendente. Além disso, devido à sensibilidade do escoamento fluidizado à escala e às condições operacionais, o processo de escalonamento torna-se extremamente complexo (Ding, 1990).

Os estudos hidrodinâmicos podem contribuir de forma significativa para o melhor conhecimento e solução desses problemas. A estrutura do escoamento multifásico em colunas

de leito fluidizado circulante é bastante complexa, caracterizada por grandes variações da fração volumétrica de sólidos ao longo do tubo ascendente, pela formação e dissipação de aglomerados de particulado e pela grande recirculação de sólidos na coluna do leito. Essas complexas condições de escoamento provêm um intenso contato superficial entre gases e sólidos, garantindo as altas taxas de reação necessárias aos processos reativos. O conhecimento da hidrodinâmica do processo é então de grande importância para que os parâmetros reativos e de transporte de massa no reator possam ser estabelecidos.

A modelagem matemática dos processos de fluidização gás-sólidos representa uma ferramenta auxiliar para a minimização dos esforços experimentais requeridos no desenvolvimento de instalações industriais. A experimentação e o desenvolvimento de protótipos são as ferramentas principais no projeto de qualquer processo industrial em engenharia. No entanto, os procedimentos de modelagem matemática e simulação numérica estão em constante desenvolvimento contribuindo de forma crescente para uma melhor compreensão de processos e fenômenos físicos. Além disso, os modelos do processo de fluidização necessitam, para sua validação, de medições experimentais complexas de difícil execução. Assim, o desenvolvimento de modelagem também representa um estímulo ao desenvolvimento de novas técnicas e métodos experimentais.

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo inicial desenvolvido sobre modelagem matemática e simulação numérica de um escoamento bifásico gás-sólidos num leito circulante.

2. FORMULAÇÃO TEÓRICA

O sistema de equações diferenciais parciais (EDP) utilizado na modelagem matemática foi formulado usando o modelo das duas fases separadas. Este modelo constitui uma das formulações principais das equações de campo macroscópicas para escoamentos bifásicos.

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). Inicialmente desenvolve-se balanços integrais de massa e quantidade de movimento para um volume de controle fixo que contenha as duas fases. Aplicam-se então os teoremas de Leibniz e de Gauss reduzindo-se o balanço integral a dois tipos de equações: as equações locais instantâneas para cada uma das fases, e as equações de salto locais instantâneas na interface, que representam a interação entre as fases na interface. Aplicam-se então o procedimento de médias de Euler às equações locais instantâneas, eliminando-se as flutuações locais instantâneas do escoamento. Como resultado desse procedimento surgem novas variáveis nas equações de campo relacionadas aos termos de interação na interface. Em seguida aplica-se leis de fechamento com o objetivo de modelar os termos não conhecidos nas equações de balanço. Por fim formula-se condições iniciais e de contorno. A seguir apresenta-se uma breve discussão relativa ao procedimento para obtenção do modelo das duas fases.

2.1 Equações locais instantâneas

A importância das equações locais instantâneas reside no fato de que constituem a base fundamental para todos os modelos bifásicos obtidos a partir de procedimentos de médias. De fato, quando cada sub-região limitada pelas interfaces é definida como um contínuo, a formulação local instantânea assume caráter de extremo rigor matemático. Assim é

recomendável que todos os modelos de escoamentos bifásicos sejam desenvolvidos a partir desta formulação, aplicando-se algum procedimento de médias. Além disso, as equações locais instantâneas permitem a modelagem direta de escoamentos separados (estratificados, de películas, anulares) de ampla aplicação industrial, por exemplo nos processos de ebulição e condensação (Ishii, 1975).

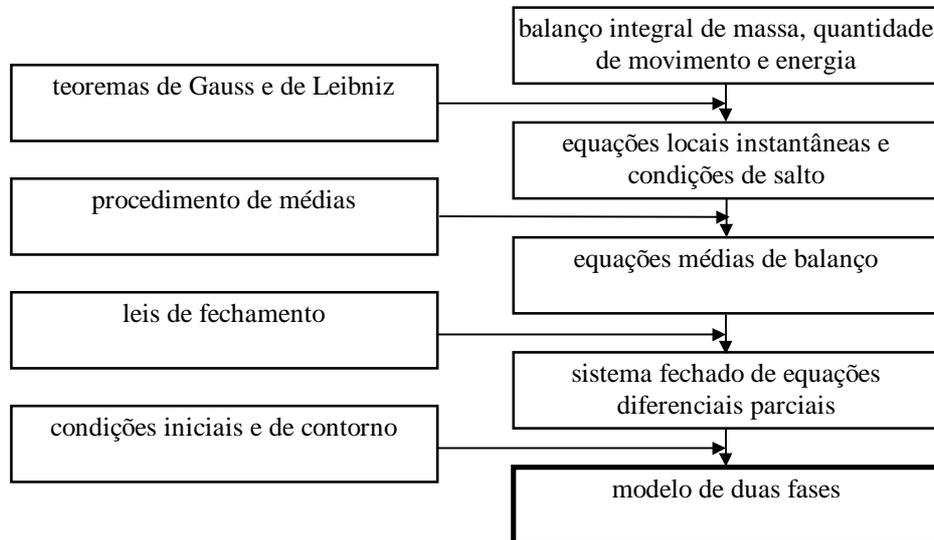


Figura 1 - Procedimento geral para a formulação do modelo de duas fases (Enwald *et al.*, 1996).

2.2 Procedimento de médias

A importância do processo de médias é que através dele eliminam-se as flutuações locais instantâneas de um escoamento multifásico, possibilitando a obtenção de parâmetros médios de movimento e propriedades do escoamento. Assim modela-se os aspectos macroscópicos do escoamento, de maior interesse em engenharia (Ishii, 1975). Através do procedimento de médias obtém-se as equações médias conservativas que, aplicadas em conjunto com as leis de fechamento e condições iniciais e de contorno, possibilitam a simulação do escoamento multifásico.

2.3 Leis de fechamento

As leis de fechamento permitem modelar os termos não conhecidos nas equações conservativas médias de balanço. As leis de fechamento são classificadas em três tipos:

1. Leis constitutivas – relatam as propriedades físicas das fases analisadas utilizando dados experimentais ou axiomas. Através das leis constitutivas são modelados o tensor das tensões viscosas, a viscosidade dinâmica, a viscosidade volumétrica e a pressão para todas as fases.
2. Leis de transferência – equações empíricas que descrevem as diferentes interações de interface entre as fases. Através das leis de transferência modela-se, na interface, o transporte de quantidade de movimento considerando o arrasto na interface em função da velocidade relativa entre as fases.
3. Leis topológicas – descrevem a distribuição espacial de uma variável específica do escoamento (por exemplo, num escoamento bifásico).

Um resumo da aplicação das leis de fechamento à um escoamento bifásico gás-sólidos é apresentado em Enwald *et al.* (1996).

2.4 Modelo das duas fases

O modelo das duas fases é obtido através da aplicação, ao sistema geral fechado de EDP, das condições iniciais e de contorno apropriadas. Estas condições são definidas em função da geometria, das interações físicas das fases com os contornos do sistema, de considerações de simetria e do estado inicial no domínio físico considerado. Como exemplo do modelo das duas fases aplicado especificamente à um escoamento bifásico gás-sólido, apresenta-se a seguir o modelo hidrodinâmico B (Gidaspow, 1994), baseado no procedimento clássico, acima descrito. Este modelo B é utilizado pelo grupo de pesquisa do Illinois Institute of Technology/Argonne National Laboratory (IIT/ANL), (Tsuo, 1989).

Equações conservativas e constitutivas do modelo hidrodinâmico B do IIT/ANL. O sistema de equações apresentado a seguir é obtido aplicando a metodologia anteriormente descrita além das seguintes hipóteses simplificativas: 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 considera-se as fases como fluidos Newtonianos.

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

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

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

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

onde

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

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

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

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

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

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

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

$$\rho_s = const \quad (12)$$

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

Nas equações anteriores U_g , U_s , ρ_g , e ρ_s são as velocidades médias (m/s) e as densidades do gás e do sólido (kg/m^3) respectivamente; α_g é a fração de vazio e α_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 τ_g e τ_s , (Pa) respectivamente. g representa a aceleração da gravidade (m/s^2), G o módulo de elasticidade do sólido (N/m^2) e β a função de arrasto na interface ($\text{kg/m}^2\text{s}$). C_{D_s} caracteriza o coeficiente de arrasto para uma partícula num meio infinito, Re_p o número adimensional de Reynolds com base em d_p , e ϕ_s a esfericidade da partícula. Na Eq.(10) μ_k significa a viscosidade dinâmica de ambas as fases (Pa.s), onde o índice k representa o índice da fase. Finalmente R_g é a constante dos gases ideais para o ar (kJ/kgK), ∂ representa a derivada parcial com respeito a uma variável dada e t o tempo (s).

3. METODOLOGIA DE SOLUÇÃO NUMÉRICA

No presente trabalho utiliza-se o código computacional MULTIFIX desenvolvido por Syamlal (1985). Este código computacional é uma extensão do código K-FIX, inicialmente desenvolvido por Rivard & Torrey (1977) (apud Syamlal, 1985) para escoamentos gás-líquido, e posteriormente adaptado por Ettehadieh (1982) para modelar escoamentos gás-sólidos. O código K-FIX baseia-se no método numérico desenvolvido por Harlow & Amsden (1975) o qual é uma extensão do método implícito e contínuo de Euler (ICE), desenvolvido por Harlow & Amsden (1971). O código K-FIX constitui a base dos códigos posteriores desenvolvidos no IIT/ANL para simulação de escoamentos multifásicos gás-sólidos.

Optou-se pela aplicação do código computacional MULTIFIX modificado, seguindo o trabalho de Tsuo (1989), e introduzindo o procedimento VSSCG proposto por Ding (1990) para calcular o tensor das tensões viscosas da fase gasosa. Esse procedimento foi adotado para calcular as tensões viscosas de ambas as fases, com as tensões viscosas da fase sólida determinadas de forma similar através do procedimento VSSCS.

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). Neste método as equações de conservação da massa (1), (2) são discretizadas implicitamente, porém as equações de conservação da quantidade de movimento

(3), (4) são discretizadas mediante uma técnica mista, explícita-implícita. Os termos associados à pressão do fluido, à pressão do sólido e à transferência de quantidade de movimento na interface são discretizados implicitamente, e os termos restantes são discretizados explicitamente. Os cálculos são desenvolvidos usando uma malha computacional composta de células fixas num espaço bidimensional (malha Euleriana). Neste caso as variáveis escalares são localizadas no centro da célula computacional e as variáveis vetoriais nas fronteiras.

3.1 Detalhes da técnica de solução

A seguir apresenta-se brevemente a técnica de solução numérica. Para resolver as equações discretizadas em diferenças finitas, utiliza-se procedimento iterativo. As equações discretizadas de conservação da quantidade de movimento, expressam-se em forma matricial como segue

$${}^n \begin{pmatrix} \delta t \beta_r + \alpha_g \rho_g & -\delta t \beta_r \\ -\delta t \beta_r & \delta t \beta_r + \alpha_s \rho_s \end{pmatrix} {}^{n+1} \begin{pmatrix} U_g \\ U_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^n (\overline{\alpha_g \rho_g U_g}) - \frac{\delta t}{\delta r} {}^{n+1} (P_{i+1}^j - P_i^j) \\ {}^n (\overline{\alpha_s \rho_s U_s}) - \frac{\delta t}{\delta r} {}^{n+1} G((\alpha_g)_i^{j+1} - (\alpha_g)_i^j) \end{pmatrix} \quad (14)$$

$${}^n \begin{pmatrix} \delta t \beta_z + \alpha_g \rho_g & -\delta t \beta_z \\ -\delta t \beta_z & \delta t \beta_z + \alpha_s \rho_s \end{pmatrix} {}^{n+1} \begin{pmatrix} V_g \\ V_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^n (\overline{\alpha_g \rho_g V_g}) - \frac{\delta t}{\delta z} {}^{n+1} (P_i^{j+1} - P_i^j) \\ {}^n (\overline{\alpha_s \rho_s V_s}) - \frac{\delta t}{\delta z} {}^{n+1} G((\alpha_g)_i^{j+1} - (\alpha_g)_i^j) \end{pmatrix} \quad (15)$$

A equação de continuidade para a fase gasosa, escreve-se como

$$D_i^j = -{}^{n+1} (\rho_g \alpha_g)_i^j + {}^n (\rho_g \alpha_g)_i^j - \frac{\delta t}{r_i \delta r} {}^{n+1} \langle (\rho_g \alpha_g r) U_g \rangle_i^j - \frac{\delta t}{\delta z} {}^{n+1} \langle (\rho_g \alpha_g) V_g \rangle_i^j \quad (16)$$

sendo D_i^j o resíduo da equação de conservação da massa da fase gasosa (kg/m^3), o qual deve ser igual a zero para se atingir convergência absoluta. Os subíndices r e z representam as direções radial e axial respectivamente, da mesma forma que os subíndices i e j . Os índices n e $n+1$ representam os valores calculados nos níveis de tempo t e $t + \Delta t$ respectivamente. Para resolver as equações em diferenças finitas a pressão em cada célula computacional é corrigida iterativamente até que D_i^j satisfaça o critério de convergência. O processo iterativo é executado até que o critério de convergência seja atingido em todas as células computacionais.

Detalhes do procedimento iterativo. Os detalhes do procedimento iterativo são os seguintes:

1. São calculados os termos explícitos convectivos ${}^n (\overline{\alpha_k \rho_k U_k})$ e ${}^n (\overline{\alpha_k \rho_k V_k})$.
2. Calcula-se os coeficientes de arrasto (termos explícitos).
3. Estima-se as velocidades num nível de tempo $n+1$ usando as Eqs. (14) e (15).
4. Calcula-se o coeficiente η_i^j de forma aproximada pela seguinte relação

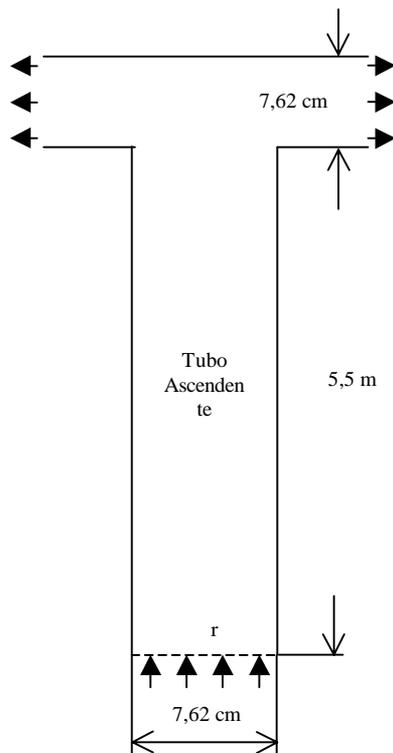
$$\frac{1}{\eta_i^j} = \frac{\partial D_i^j}{\partial P_i^j} = \frac{\alpha_g}{(C_i^j)^2} + \frac{(\delta t)^2}{r_i (\delta r)^2} \left(r_{i+\frac{1}{2}} (\alpha_g)_i^{j+\frac{1}{2}} + r_{i-\frac{1}{2}} (\alpha_g)_i^{j-\frac{1}{2}} \right) + \frac{(\delta t)^2}{(\delta z)^2} \left((\alpha_g)_i^{j+\frac{1}{2}} + (\alpha_g)_i^{j-\frac{1}{2}} \right) \quad (17)$$

onde C_i^j é a velocidade do som no ar (m/s). O coeficiente η_i^j representa as derivadas de resíduo D_i^j com respeito à pressão e é obtido analiticamente a partir das equações de conservação da quantidade de movimento.

- O valor da pressão é corrigido iterativamente. A correção da pressão é efetuada em cada célula computacional até que seja atingido o critério de convergência, ou até que o número de iterações seja maior que um máximo especificado. O processo iterativo continua até que toda a malha computacional seja percorrida. Se não for atingido o critério de convergência em algumas das células computacionais, o ciclo é repetido. O número de ciclos de cálculo é restringido pelo número externo de iterações.

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM LEITO CIRCULANTE

A seguir apresenta-se resultados de simulação numérica do tubo ascendente de um leito circulante segundo as condições e geometria especificadas na Fig. 2. Utiliza-se o modelo B do (IIT/ANL).



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: $G_s = 24,9 \text{kg/(sm}^2)$
 Viscosidade do sólido: $\mu_s = 0,509 \text{Pa s}$

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

$$\frac{\partial f}{\partial z} = 0 \quad (18)$$

onde f pode ser α_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. Nessa figura, quanto menos intenso o tom de cinza maior a fração volumétrica de sólidos. Observa-se a formação e dissipação de aglomerados, formando-se o primeiro aos 1,5 segundos aproximadamente. Os resultados mostrados na Fig.3 são qualitativamente semelhantes aos obtidos por Tsuo (1989), que modelou essa mesma instalação utilizando coordenadas cartesianas.

Na Fig. 4 apresenta-se a variação da velocidade mássica da fase sólida, G_s , ($\text{kg/m}^2\text{s}$) em função do tempo. Esse valor temporal de G_s é obtido por integração sobre toda a área transversal do leito na altura correspondente à 5,3 metros a partir da entrada. O gráfico mostra

o comportamento clássico de um leito circulante, que apresenta oscilações de baixa frequência (cerca de 0,2 Hertz) como reportado na literatura (Tsuo, 1989). Os resultados da simulação apresentam boa concordância com o valor médio experimental de G_s obtido por Luo, (1987). No intervalo de tempo considerado não observa-se a tendência ao estabelecimento de um regime estacionário bem definido.

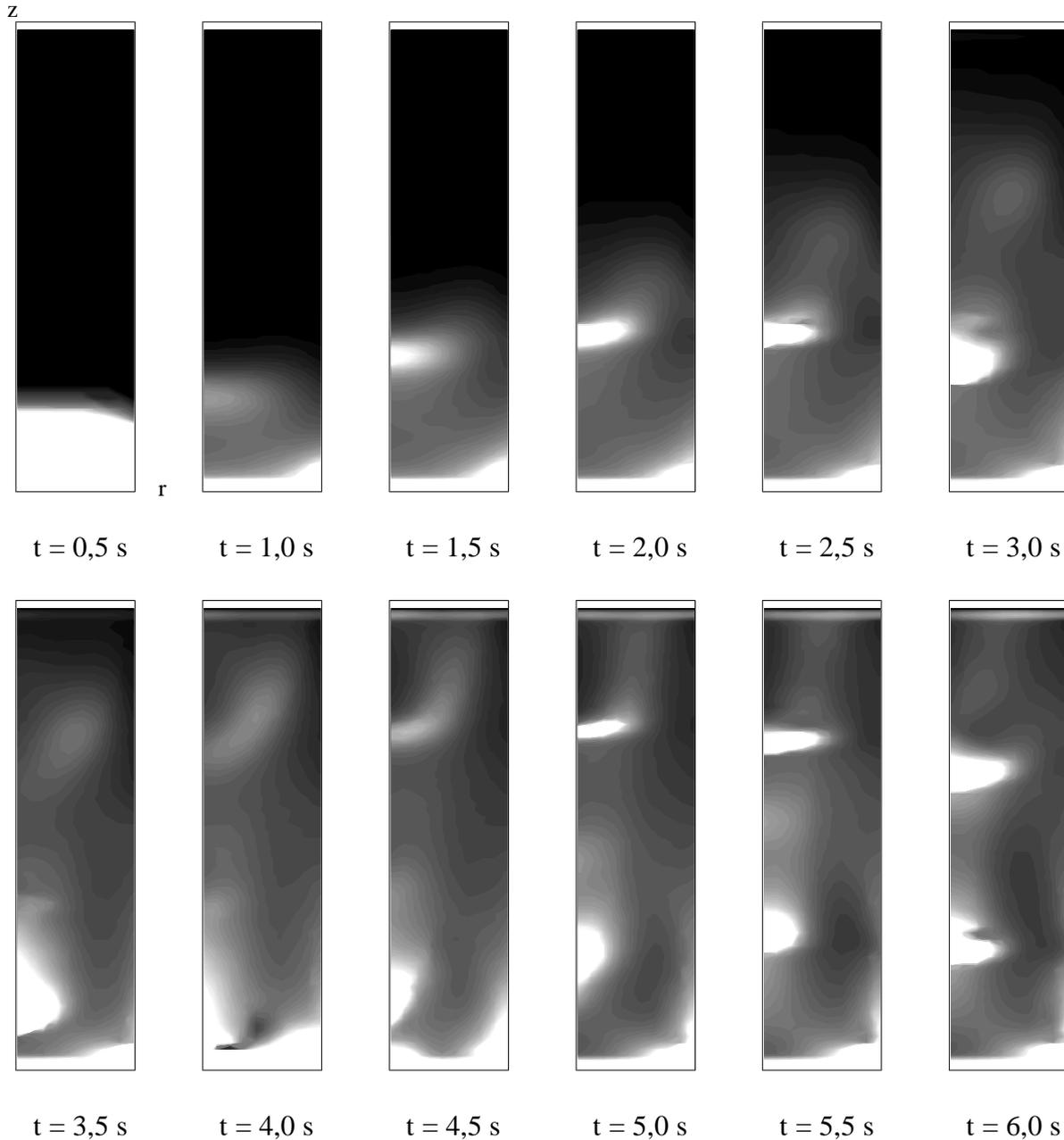


Figura 3 - Perfis do contorno da fração volumétrica de sólidos em função do tempo.

A Fig. 5 mostra os perfis simulados e experimental da variação radial da velocidade local axial para ambas as fases. No caso da fase gasosa o modelo apresenta desvios significativos dos resultados experimentais obtidos de Luo, (1987). Para ambas as fases as curvas simuladas mostram um comportamento irreal próximo ao centro da coluna, o que possivelmente deve-se a adoção do sistema de coordenadas cilíndricas com simetria radial. Tal fato sugere a incorreção desta condição de contorno neste tipo de simulação. Observa-se que apesar dos dados simulados terem sido integrados para diferentes intervalos de tempo, os resultados

mostram tendências similares. Esse fato merece destaque posto que este tipo de escoamento é caracterizado por grandes flutuações dos campos de velocidades e nunca chega a atingir a condição de um escoamento estacionário.

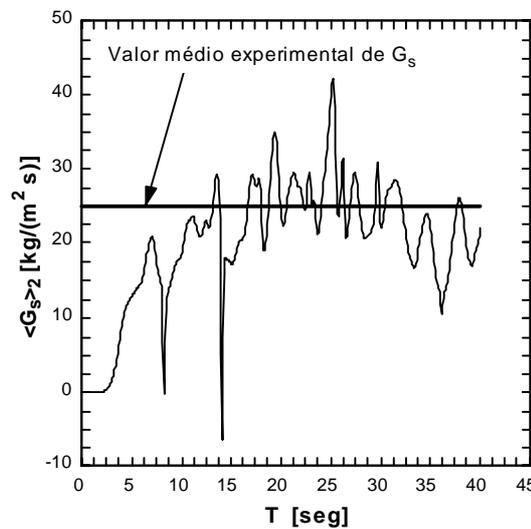


Figura 4 – Velocidade mássica do sólido G_s em função do tempo na altura de 5,3 metros. [O valor médio experimental de G_s é $24,9 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$, (Luo, 1987)].

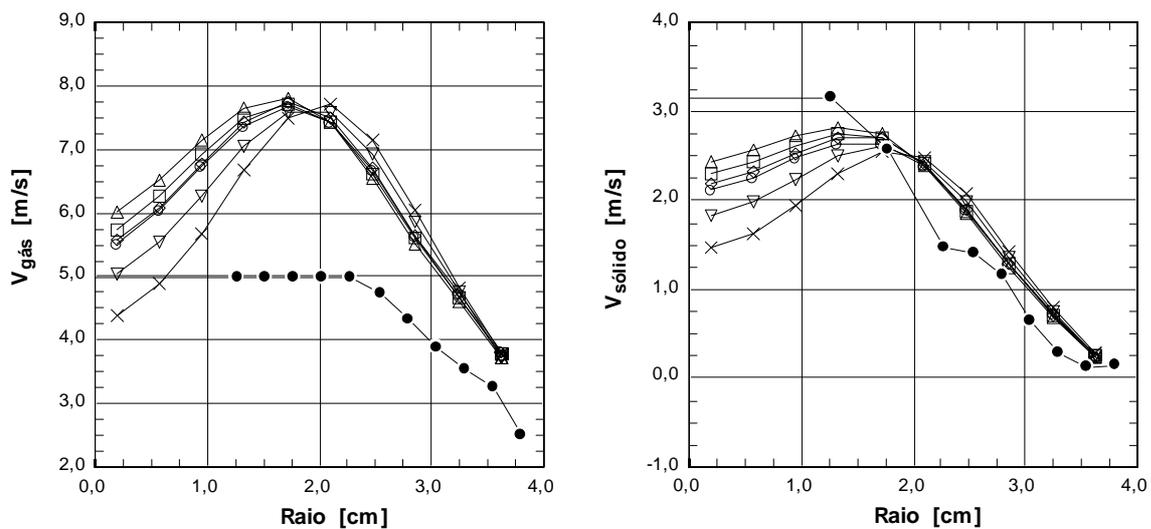


Figura 5 – Velocidade axial local média no tempo, para as fases gasosa e sólida, respectivamente. [• experimental (Luo, 1987), simulações para diferentes intervalos de tempo: x 10 à 15 seg., ∇ 10 à 20 seg., \diamond 10 à 25 seg., \triangle 10 à 30 seg., \square 10 à 35 seg., \circ 10 à 40 seg.].

5. COMENTARIOS FINAIS

Observa-se qualitativamente na Fig. 3 que 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.

Nas Figs. 4 e 5 compara-se resultados de simulação obtidos através do modelo matemático usado (modelo B) com resultados experimentais. Observa-se grandes diferenças

entre os resultados comparados. 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. Além disso agrega-se as incertezas contidas na obtenção dos resultados experimentais apresentados, o que é próprio das medições experimentais em escoamentos multifásicos. Portanto pode-se afirmar que ainda existem muitos aspectos físicos próprios do processo a serem pesquisados, tais como: o cálculo dos termos de transferência de quantidade de movimento na interface, a modelagem da turbulência em ambas as fases nas regiões dispersas do leito, a determinação da denominada pressão do sólido, que constitui em si, um conceito físico bastante abstrato. Mencione-se ainda os problemas matemáticos e numéricos que caracterizam a solução destes sistemas de equações diferenciais parciais quase lineares que descrevem a hidrodinâmica dos escoamentos bifásicos gás-sólidos. Uma descrição mais detalhada do trabalho apresenta-se em Cabezas, (1999).

REFERÊNCIAS

- 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.
- 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., 1971, A numerical fluid dynamics calculation method for all flow speeds, Journal of Computational Physics, v.8, p.197-213.
- Harlow, F.H. & Amsden, A. A., 1975, Numerical calculations of multiphase fluid flow, Journal of Computational Physics, v.17, p.19-52.
- Ishii, M., 1975, Thermo-fluid Dynamic Theory of Two-phase Flow, Eyrolles, Paris.
- Luo, K. M., 1987, Dilute, Dense-Phase and Maximum Solids-Gas Transport, Ph.D. Thesis, Illinois Institute of Technology, Chicago.
- 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.

MATHEMATICAL MODELING AND NUMERICAL SIMULATION OF THE GAS-SOLIDS TWO-PHASE FLOW IN A CIRCULATING FLUIDIZED BED

Abstract. *An initial study is presented regarding mathematical modeling and numerical solution of gas-solids two-phase flows in fluidization processes, particularly in circulating fluidized beds. A theoretical formulation of two-fluid model and a numerical methodology used in the solution of the model are shortly described. Finally, results of numerical simulation in circulating fluidized beds are presented.*

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