

# AValiação de Resultados de Simulação Numérica do escoamento gás-sólido no tubo ascendente de um leito fluidizado circulante através de metodologia de identificação e caracterização de estruturas coerentes

**Luben Cabezas Gómez**

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos - EESC-USP, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590 - São Carlos - SP.

[lubencg@sc.usp.br](mailto:lubencg@sc.usp.br)

**Luciano Vieira de Souza**

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos - EESC-USP, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590 - São Carlos - SP.

[souzalv@sc.usp.br](mailto:souzalv@sc.usp.br)

**Fernando Eduardo Milioli**

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos - EESC-USP, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590 - São Carlos - SP.

[milioli@sc.usp.br](mailto:milioli@sc.usp.br)

**Resumo.** Neste trabalho valida-se resultados de simulação numérica para escoamentos gás-sólido no tubo ascendente de um leito fluidizado circulante através de uma metodologia de identificação e caracterização de estruturas coerentes, "clusters". A simulação numérica é desenvolvida usando o modelo hidrodinâmico B das duas fases separadas com viscosidade constante, e o código numérico MICEFLOW. A metodologia de caracterização de estruturas coerentes utilizada baseia-se na determinação de quatro características fundamentais, associadas ao seu tempo médio de duração, sua fração volumétrica média de sólidos, fração de tempo de existência, e frequência de ocorrência. Para a caracterização das estruturas coerentes, aplica-se um critério de identificação relacionado com o valor médio temporal da fração volumétrica de sólidos. No presente trabalho, os resultados quantitativos obtidos não são validados devido a indisponibilidade de dados experimentais que permitam o cálculo das características fundamentais das estruturas coerentes. No entanto, através de comparações com resultados experimentais de literatura, pode-se validar os resultados de simulação obtidos em termos qualitativos. Além disso, comparações com dados experimentais médios são apresentadas mostrando as potencialidades do modelo para captar as peculiaridades dos escoamentos do ponto de vista das escalas macroscópicas.

**Palavras chave:** Estruturas coerentes, simulação numérica, escoamentos gás-sólido, leito fluidizado circulante.

## 1. Introdução

Em sistemas fluidizados a maioria das partículas formam estruturas coerentes, as quais são regiões de alta concentração de particulado em comparação à concentração de sólido média na coluna do leito. Estes grupos de partículas se movimentam como um conjunto apenas com pequenos movimentos relativos (Helland *et al.*, 2002). De acordo com Horio & Clift (1992), aglomerados são grupos de partículas mantidas juntas devido as forças inter-partículas, enquanto os "clusters" são grupos de partículas mantidas juntas como resultado de efeitos hidrodinâmicos. A consideração desta definição é um fato importante, pois em muitos trabalhos a expressão aglomerados também é utilizada para denominar os "clusters". Outro aspecto importante refere-se a sua forma geométrica. Horio & Kuroki (1994), através de um estudo de visualização tridimensional utilizando uma técnica laser (Laser sheet technique), afirmam que os "clusters" são estruturas que têm forma de parabolóide na parte inferior seguida de uma esteira de gás na sua parte superior. Davidson (2000), com base em alguns trabalhos da bibliografia afirma que os clusters são grupos de partículas em forma de lâminas verticais com razão largura/altura pequena, que retém a sua coerência durante uma distancia de queda considerável. Büsing & Reh (2001) indicaram que os clusters são agregados não esféricos com razão comprimento/diâmetro de até 10, em contraposição ao descrito nos trabalhos do grupo de Horio (Horio & Kuroki, 1994 e Tsukada *et al.*, 1997). Em relação a essa discrepância, Lackner *et al.* (2001) notaram que a técnica Laser utilizada por Horio e colaboradores apenas permite obter imagens externas ao escoamento restringindo a sua aplicação à escoamentos muito dispersos. Utilizando uma modificação dessa técnica, com filmagem interna, esses autores estudaram escoamentos mais densos, característicos de leitos circulantes. A forma geométrica dos clusters detectados assemelhou-se à descrita por Davidson (2000).

Muitos estudos numéricos têm sido desenvolvidos para o estudo dos clusters. Entre estes, o de Tsuo & Gidaspow (1990) foi pioneiro. Neste trabalho, utilizando o modelo das duas fases separadas, apresenta-se um estudo de simulação sobre a formação de clusters considerando dois aspectos básicos: a descrição de várias características dos clusters (densidade, tamanho e padrão de escoamento) e a discussão sobre o efeito de vários parâmetros no seu processo de formação. Os parâmetros considerados foram: a velocidade do gás de entrada, a velocidade mássica do sólido, o tamanho de partícula, o diâmetro e a altura do tubo ascendente (riser), e o processo de mistura de partículas finas. Segundo os autores, de forma geral, foi demonstrado que a diminuição da velocidade mássica do sólido e do tamanho de partícula, e o aumento da velocidade do gás de entrada, da mistura de partículas finas e do diâmetro do tubo ascendente produziram uma diminuição da população de "clusters".

A partir da realização deste primeiro estudo (Tsu, 1989 e Tsuo & Gidaspow, 1990) outros trabalhos, nesta área de simulação, começaram a ser desenvolvidos. Dentre os mais recentes destacam-se aqueles que utilizam a formulação Euleriana-Lagrangeana (Hoomans *et al.*, 1998; Ouyang & Li, 1999; Helland *et al.*, 2000 e Helland *et al.*, 2002; entre outros). A maior desvantagem deste procedimento é incapacidade de considerar a quantidade de partículas necessárias devido ao custo computacional envolvido. Porém este procedimento permite estudar com mais exatidão as forças que atuam na interface, não se restringindo apenas ao arrasto estacionário na interface como fazem a maioria dos modelos baseados na formulação Euleriana para todas as fases. Com respeito a estes modelos, a principal desvantagem parece ser a dificuldade de obtenção de resultados independentes do tamanho de malha. Segundo Agrawal *et al.* (2001) se for considerada uma malha suficientemente fina a integração numérica direta do sistema de equações governantes torna-se praticamente impossível com os recursos computacionais atuais.

Neste trabalho aplica-se a metodologia proposta por Sharma *et al.* (2000) visando principalmente um estudo de caracterização de "clusters". Sharma *et al.* (2000) propõem três critérios para a identificação e definição de "clusters" com base em critérios propostos por Soong *et al.* (1993) apud Sharma *et al.* (2000). Além disso descrevem quatro características básicas dos "clusters" que permitem quantificar a influência de alguns parâmetros do escoamento sobre estas estruturas. Sharma *et al.* (2000) investigaram o efeito que o tamanho de partícula e a velocidade superficial do gás têm sobre os "clusters" a partir de dados experimentais de fração de sólido medidos com sonda capacitiva em leito circulante de 15 cm de diâmetro. A metodologia, originalmente estabelecida a partir de dados experimentais (Soong *et al.*, 1993; Tuzla *et al.* 1998 e Sharma *et al.*, 2000), foi recentemente aplicada por Helland *et al.* (2002) utilizando resultados de simulação numérica.

## 2. Formulação e procedimento teórico

### 2.1. Modelo matemático

No presente trabalho utiliza-se o modelo hidrodinâmico B para um escoamento gás-sólido desenvolvido no IIT (Illinois Institute of Technology), e incluído no código numérico MICEFLOW (Jayaswal, 1991). Um resumo do sistema de equações governantes desse modelo é apresentado na Tabela 1. Descrições mais detalhadas da formulação são mostradas em Jayaswal (1991), Gidaspow (1994), Enwald *et al.* (1996) e Cabezas-Gómez e Milioli (2001). O modelo, denominado modelo tradicional das duas fases separadas, considera uma descrição Euleriana para cada fase, possibilitando o uso da teoria cinética dos escoamentos granulares (TCEG) com base no desenvolvimento de Gidaspow (1994). O código numérico considera a conservação de massa, quantidade de movimento e energia para todas as fases, e de energia cinética turbulenta para as fases sólidas. O programa computacional permite a descrição de escoamentos multifásicos que compreendem várias fases sólidas, caracterizadas cada uma delas por um diâmetro médio, pela sua densidade e fator de esfericidade, e duas fases fluidas diferentes. Neste trabalho considera-se um escoamento gás-sólido, que compreende uma fase gasosa (ar) e apenas uma fase sólida (bolinhas de vidro) com um diâmetro médio de partícula. Ambas as fases são consideradas laminares e isotérmicas a uma temperatura de 300 K e sem transferência de massa na interface. Assume-se modelo reológico Newtoniano para ambas as fases. A pressão do sólido é modelada em função do módulo de elasticidade,  $G$ , da fase sólido, através de correlação empírica proposta por Rietema & Mutsers (1973) apud Jayaswal (1991). Na formulação da função de arrasto na interface, considera-se a correlação de Ergun (1952) para  $\alpha_s \geq 0,2$  e a correlação de Wen & Yu (1966) para  $\alpha_s < 0,2$ . Este procedimento é muito utilizado na literatura (ver Gidaspow 1994).

Na Tabela 1 os subscritos (g) e (s) representam as fases gasosa e sólida respectivamente,  $v_g$  e  $v_s$  são as velocidades médias (m/s),  $\rho_g$  e  $\rho_s$  são as densidades ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\alpha_g$  e  $\alpha_s$  as frações volumétricas,  $\tau_g$  e  $\tau_s$  são os tensores das tensões viscosas (Pa),  $P$  significa a pressão termodinâmica do gás (Pa),  $g$  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 na interface para uma partícula num meio infinito,  $Re_s$  é o número de Reynolds com base no diâmetro da partícula  $d_p$ ,  $\phi_s$  é a esfericidade das partículas,  $\mu$  representa a viscosidade dinâmica ( $\text{kg/ms}$ ),  $R_g$  a constante dos gases ideais ( $\text{kJ/kgK}$ ), e  $t$  é o tempo (s).

Tabela 1. Modelo matemático B (Gidaspow, 1994).

<p>1. Equação da continuidade, fase k (k = g, s)</p> $\frac{\partial(\rho_k \alpha_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \alpha_k \mathbf{v}_k) = 0$	<p>6. Equação de estado (fase gasosa como gás ideal)</p> $\rho_g = P/(R_g T)$ $\rho_s = \rho_s \text{ (constante)}$
<p>2. Equação da quantidade de movimento, Modelo B</p> <p>Fase gasosa:</p> $\frac{\partial(\rho_g \alpha_g \mathbf{v}_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \alpha_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) = -\nabla P$ $-\beta_B (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_g \boldsymbol{\tau}_g) + \rho_g \mathbf{g}$ <p>Fase sólida:</p> $\frac{\partial(\rho_s \alpha_s \mathbf{v}_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \mathbf{v}_s \mathbf{v}_s) = \beta_B (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s)$ $+ \nabla \cdot (\alpha_s \boldsymbol{\tau}_s) - G \nabla \alpha_s + (\rho_s - \rho_g) \alpha_s \mathbf{g}$	<p>7. Função de arrasto na interfase, <math>\beta</math>, Modelo B Ergun (1952) para <math>\alpha_s \geq 0,2</math>:</p> $\beta = 150 \frac{\alpha_s^2 \mu_g}{\alpha_g^2 (d_p \phi_s)^2} + 1,75 \frac{\rho_g \alpha_s  \mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s }{(\alpha_g d_p \phi_s)}$ <p>Wen and Yu (1966) para <math>\alpha_s &lt; 0,2</math>:</p> $\beta = \frac{3}{4} C_{Ds} \frac{\rho_g \alpha_s \alpha_g  \mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s }{(\alpha_g d_p \phi_s)} \alpha_g^{-2,65}$ <p>onde</p> $C_{Ds} = \begin{cases} \frac{24}{Re_s} (1 + 0,15 \cdot Re_s^{0,687}) & Re_s < 1000 \\ 0,44 & Re_s \geq 1000 \end{cases}$
<p>3. Tensor das tensões, fase k (k = g, s)</p> $\boldsymbol{\tau}_k = \mu_k \left[ \nabla \mathbf{v}_k + (\nabla \mathbf{v}_k)^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}_k) \mathbf{I} \right]$	<p>O número de Reynolds do particulado calcula-se como</p> $Re_s = \frac{\alpha_g \rho_g  \mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s  d_p \phi_s}{\mu_g}$
<p>4. Modulo de elasticidade do sólido</p> $G(\alpha_g) = 10^{-8,686\alpha_g + 6,385} \text{ dyn/cm}^2$	
<p>5. Definição da fração volumétrica</p> $\alpha_g + \alpha_s = 1$	

## 2.2. Critérios de identificação e características dos "clusters"

Soong *et al.* (1993) apud Sharma *et al.* (2000) basearam-se nas seguintes diretrizes para definir os "clusters":

- A concentração de sólido no "cluster" deve ser significativamente maior que a concentração de sólido média no tempo na posição dada, para as condições de operação dadas.
- A perturbação na concentração de sólido devida aos "clusters" deve ser maior que as flutuações aleatórias de fundo da fração de sólido.
- Esta perturbação deve ser medida num volume de amostragem com um comprimento de escala característico uma ou duas ordens de grandeza maior que o diâmetro de partícula.

Considerando estas diretrizes Soong *et al.* propuseram o seguinte critério: a fração volumétrica de sólido local temporal para o "cluster" deve ser maior que a fração média no tempo em pelo menos duas vezes o desvio padrão ( $2\sigma$ ). Desta maneira os "clusters" podem ser identificados, e considerados como tal, se a concentração instantânea de sólido excede este limite. Este critério foi utilizado por Tuzla *et al.* (1998) para detectar "clusters" num leito fluidizado tipo "downer". Sharma *et al.* (2000) modificaram ligeiramente o critério com base em evidências visuais. Segundo os autores o "cluster" detectado com o critério ( $2\sigma$ ) torna-se uma entidade física diferenciada assim que a concentração de sólido instantânea torna-se maior que a fração de sólido média no tempo. Isto leva aos seguintes critérios de vida do "cluster":

- O "cluster" é detectado quando a concentração instantânea de sólido é maior que o seu valor médio no tempo mais duas vezes o desvio padrão ( $2\sigma$ ).
- O momento inicial de vida do "cluster" é o último valor temporal para o qual a sua densidade excede a densidade média antes de satisfazer ao critério ( $2\sigma$ ).
- O momento final de vida do "cluster" é o primeiro valor temporal para o qual a sua densidade é menor que a concentração média no tempo depois de ter satisfeito ao critério ( $2\sigma$ ).

Este critério, denominado critério médio de referência, considera um tempo de duração dos "clusters" maior que o critério ( $2\sigma$ ) de Soong *et al.*. Os autores afirmam que o critério de detecção de "clusters" proposto é razoável porém um tanto arbitrário. Contudo, observam que o uso de um fator mais rigoroso que permita separar o ruído de fundo (e.g.  $3\sigma$ ) pode alterar quantitativamente os resultados, mas não deve alterar as características gerais da dinâmica dos "clusters".

O procedimento adotado é mostrado na Figura 1. A Figura 1a mostra um sinal temporal da fração volumétrica de sólido local típico resultante de simulação. São indicados a concentração de sólido média no tempo  $\bar{\alpha}_s$  e o limiar  $\bar{\alpha}_s + 2\sigma$ . Na Figura 1b apresenta-se uma amplificação deste sinal temporal dos 20 aos 30 segundos, onde observa-se a existência de um "cluster" no intervalo de tempo de  $T_a$  a  $T_b$ .

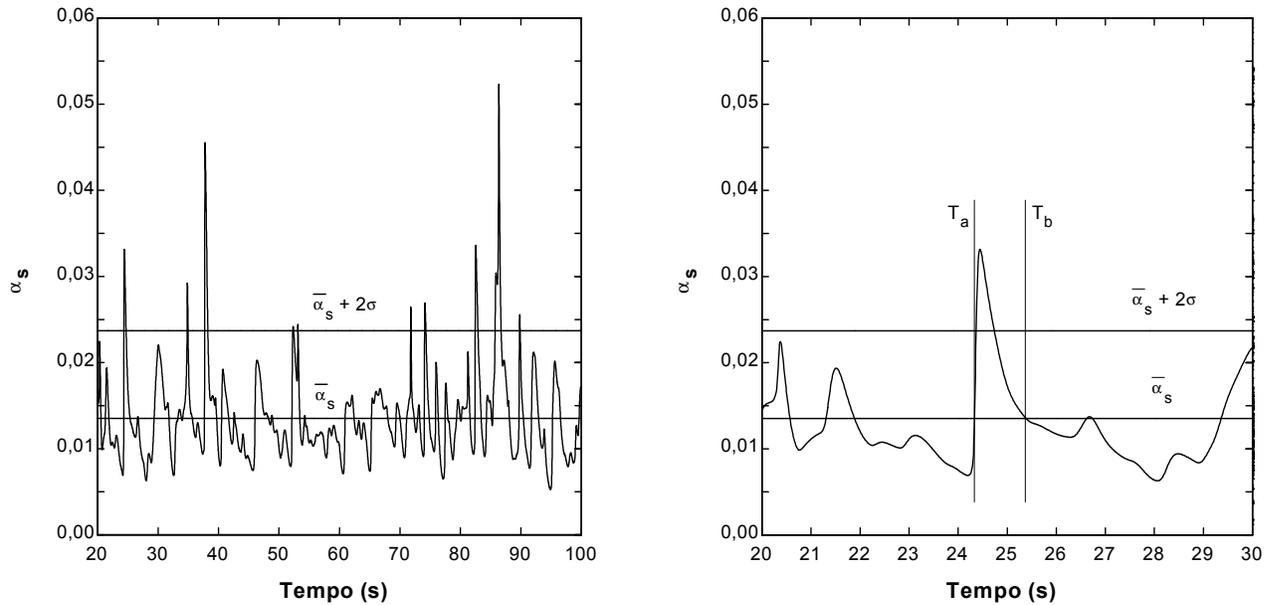


Figura 1. Variação temporal da fração volumétrica de sólido local típica resultante de simulação.

Uma vez que os clusters são identificados pelo critério médio de referência, as quatro características básicas dos clusters definidas em Tuzla *et al.* (1998) e Sharma *et al.* (2000) podem ser calculadas. Estas características são: o tempo médio de duração, a frequência de ocorrência, a fração temporal de existência e a concentração média de sólidos. As seguintes definições são utilizadas:

- Tempo médio de duração ( $\tau_c$ ): Tempo médio de duração de todos os "clusters" no volume de amostragem (no caso de Sharma, onde resultados experimentais são usados, trata-se do volume de abrangência da sonda capacitiva; quando resultados de simulação são usados, trata-se do volume de uma célula computacional). Considerando  $\tau_i$  como o tempo de duração do cluster  $i$ ,  $\tau_c$  resulta

$$\tau_c = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} \quad (1)$$

onde  $n$  é o número total de "clusters" detectado no período de observação considerado ( $\tau$ ).

- Frequência de ocorrência ( $N_c$ ): Frequência na qual os "clusters" são observados no volume de amostragem calculada como o número médio de "clusters" por segundo observados no tempo total de observação ( $\tau$ ).
- Fração temporal de existência ( $F_c$ ): Fração do tempo total ( $\tau$ ) correspondente à existência de "clusters" no volume de amostragem, i.e.

$$F_c = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{\tau} \quad (2)$$

- Concentração média de sólidos ( $\alpha_{sc}$ ): Soma das frações médias de sólido para cada "cluster" sobre o número de clusters ( $n$ ) detectados no tempo de observação, i.e.

$$\alpha_{sc} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{\alpha}_{s,i}}{n} \quad (3)$$

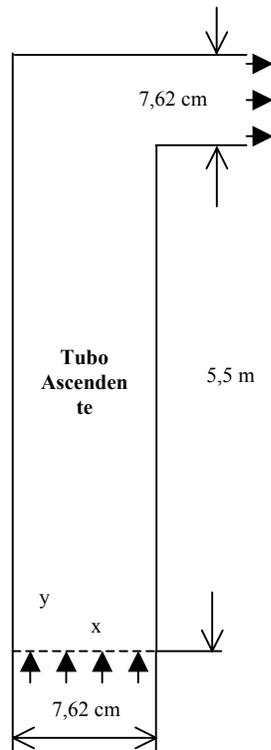
Em adição, são determinados valores médios dos parâmetros acima na seção transversal do tubo ascendente, i.e.

$$\langle f \rangle = \frac{1}{d} \int_0^d f(x) dx \quad (4)$$

onde  $x$  é a coordenada na direção horizontal e  $d$  é o comprimento da seção transversal do tubo ascendente.

### 3. Geometria de simulação, condições iniciais e de contorno

A Figura 2 mostra a geometria de simulação e as condições iniciais e de contorno consideradas na entrada e saída do tubo ascendente para ambas as fases. Na seção de entrada considera-se escoamento pistonado unidimensional e na seção de saída considera-se condição de continuidade para todas as variáveis, com exceção da pressão do gás. Nas paredes considera-se condição de não deslizamento para a fase gasosa, e de deslizamento parcial para a fase sólida seguindo Ding & Gidaspow (1990). Nas simulações considera-se malha computacional (22x297) não uniforme na direção axial, e formulação em sistema cartesiano de coordenadas. A viscosidade do sólido foi tomada de Tsuo & Gidaspow (1990).



#### 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:  $G_s = 24,9 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$   
 Viscosidade do gás:  $\mu_g = 1,8 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$   
 Viscosidade da fase sólida:  $\mu_s = 0,509 \text{ Pa s}$

#### 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

$$\frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

onde  $f$  pode ser  $\alpha_g$ ,  $u_g$  ou  $u_s$   
 Pressão do gás fixa:  $P = 117,2049 \text{ kPa}$

#### Condições computacionais:

$\delta x = 22 \times 0,381 \text{ cm}$   
 $\delta y_1 = 11 \times 1,66$ ;  $\delta y_2 = 280 \times 1,905$ ;  $\delta y_3 = 6 \times 1,524 \text{ (cm)}$   
 $\delta t = 0,00005 \text{ s}$   
 Número de células:  $(22 \times 297) = 6534$   
 Tempo real de cálculo  $t = 100 \text{ s}$

Figura 2. Geometria e condições iniciais e de contorno usadas na simulação da instalação do IIT (Luo, 1987; Tsuo, 1989) assumindo coordenadas cartesianas 2D.

### 4. Resultados

Nesta seção, primeiramente apresenta-se sucintamente uma comparação de resultados de simulação com dados experimentais médios, com relação aos perfis radiais da velocidade axial de ambas as fases e da fração volumétrica de sólido. Posteriormente os resultados de simulação numérica obtidos são analisados de forma qualitativa através da metodologia proposta por Sharma *et al.* (2000) com relação as características fundamentais das estruturas coerentes ("clusters").

#### 4.1. Comparação de resultados de simulação com dados experimentais médios

Nas Figuras 3a e 3b apresenta-se comparações de perfis radiais médios no tempo da velocidade axial para as fases gasosa e sólida, respectivamente, com resultados experimentais de Luo (1987). No caso da fase gasosa observa-se discrepâncias significativas entre os resultados de simulação e os dados experimentais, sobre tudo no centro da coluna. Esses desvios podem ser consequência das hipóteses adotadas no modelo matemático empregado, onde a turbulência na fase gasosa é desprezada entre outras simplificações, e também devido às incertezas experimentais características das medições da velocidade local da fase gasosa. O perfil da velocidade axial para a fase sólida mostra um comportamento mais adequado quando comparado com os resultados experimentais. Percebe-se claramente a existência de uma camada anular de sólido de velocidade negativa nas regiões próximas à parede. Isto é uma evidência do padrão de escoamento pistonado anular próprio destes escoamentos. Pode-se dizer que o modelo prediz melhor os perfis de velocidade da fase sólida, como evidenciado em publicação recente (Cabezas-Gómez & Milioli, 2002).

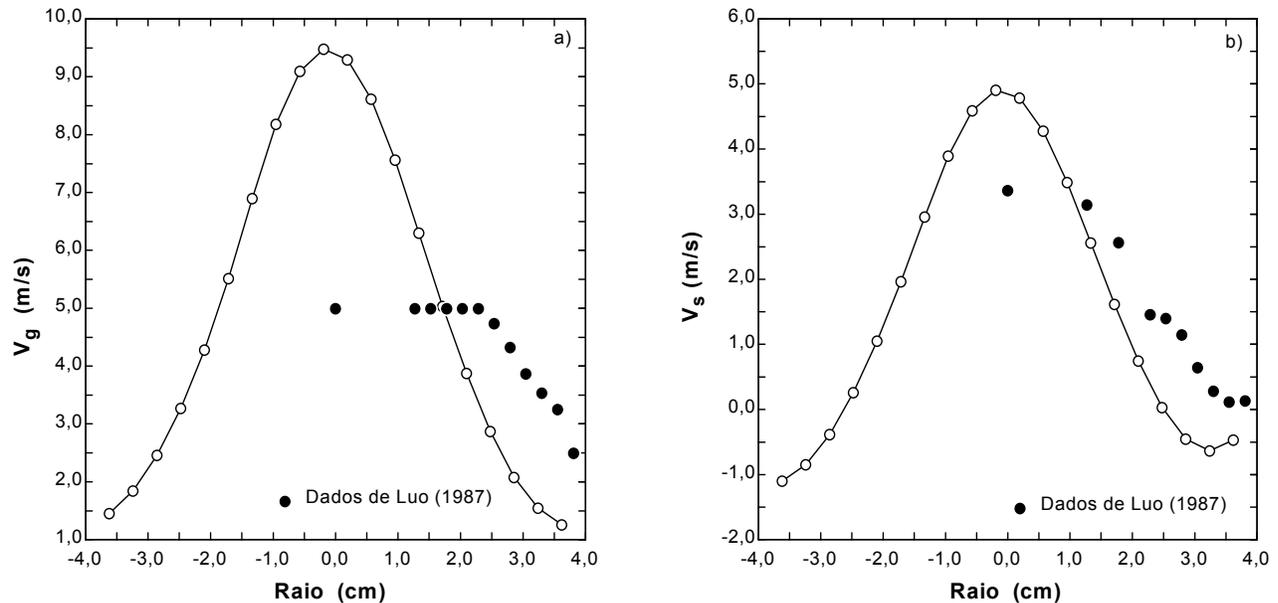


Figura 3. Perfis radiais médios no tempo da velocidade axial para ambas as fases 3,4 metros acima da entrada, em comparação com dados experimentais de Luo (1987).

A Figura 4 apresenta o perfil radial da fração volumétrica de sólido média no tempo. Este perfil radial de  $\alpha_s$  apresenta-se qualitativamente correto, observando-se uma boa concordância entre os resultados de simulação e os dados experimentais. As maiores diferenças quantitativas são detectadas na região mais próxima à parede. Porém pode-se considerar que o modelo apresenta resultados da fração de sólidos razoáveis, permitindo captar o padrão de escoamento pistonado anular com uma concentração de sólido maior nas regiões próximas à parede e menor no centro da coluna.

Outras comparações de resultados de simulação obtidos com o mesmo modelo matemático e o mesmo procedimento numérico podem ser vistos em Cabezas-Gómez & Milioli (2001 e 2002). Salienta-se que nesses trabalhos outra malha computacional foi empregada. Entretanto, os resultados apresentaram o mesmo comportamento qualitativo. Os resultados mostram, que o modelo capta adequadamente o comportamento do tipo de instalação simulada.

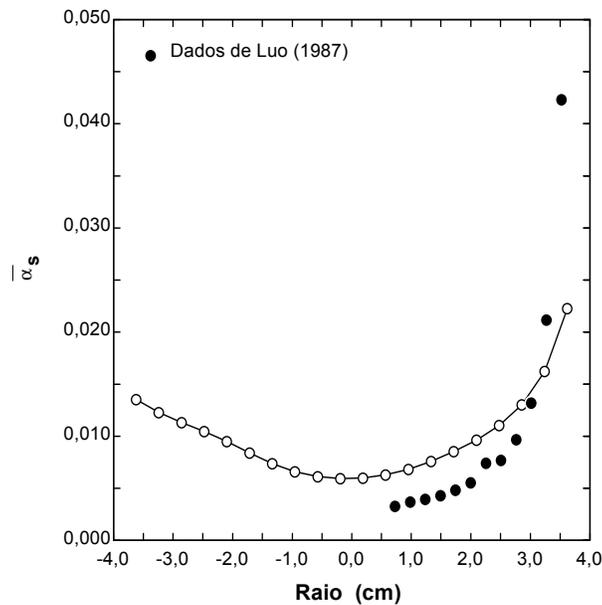


Figura 4. Perfil radial da fração volumétrica de sólido média no tempo 3,4 metros acima da entrada, em comparação com dados experimentais de Luo (1987).

#### 4.2. Análise das características dos "clusters" a partir dos resultados de simulação numérica

Na Figura 5 mostra-se os perfis radiais da fração volumétrica de sólido média no tempo em seis seções transversais do leito. Os perfis mostram um comportamento similar entre si e em comparação com os dados experimentais. O único perfil discrepante é o correspondente a 5,5 metros de altura próximo a saída da coluna. Neste caso observa-se um acúmulo de sólido no centro da coluna, devido possivelmente, à geometria da seção de saída (ver Figura 2). Essa região impõe um obstáculo ao escoamento propiciando a formação de "clusters". Exceto neste ultimo caso, em todos os outros percebe-se o padrão de escoamento pistonado anular próprio de leitos circulantes. Um comportamento similar ao mostrado na Figura 5, nota-se na Figura 6 em relação aos perfis radiais da concentração média de sólido nos "clusters",  $\alpha_{sc}$ . Este parâmetro também mostra uma concentração de sólido maior nas regiões próximas às paredes. A partir de 4,5 metros de altura os perfis de  $\alpha_{sc}$  já acusam o efeito aglomerador da seção de saída, enquanto nos perfis de  $\alpha_s$  esse efeito só é detectado a 5,5 metros. Para a mesma seção da coluna, a concentração de sólido nos "clusters" é, como esperado, sempre maior que a concentração de sólido média no tempo.

A Figura 7 mostra uma comparação de valores médios na seção transversal da coluna, entre a fração volumétrica de sólido média no tempo,  $\alpha_s$ , e a concentração temporal média de sólido em "clusters",  $\alpha_{sc}$ . Ambos parâmetros  $\langle \alpha_{sc} \rangle$  e  $\langle \alpha_s \rangle$  apresentam um comportamento similar, com uma pequena diferença na altura de 5,5 metros onde se percebe um leve aumento de  $\langle \alpha_{sc} \rangle$  enquanto  $\langle \alpha_s \rangle$  diminui. Mais uma vez, isto reflete o acúmulo de sólidos com formação de "clusters" na região de saída do leito. Na região inferior do leito a concentração de sólido é alta. Nesta região mais densa "clusters" também são detectados pelos critérios de Sharma *et al.*, porém podem não existir de fato. Isto deve ser pesquisado com mais profundidade, seria razoável prever "clusters" na região inferior do leito?

O tempo de duração dos "clusters",  $\tau_c$ , é mostrado na Figura 8. Percebe-se uma grande variação relativa dos perfis radiais através do leito observando-se valores elevados de  $\tau_c$  nas regiões próximas à parede direita da coluna. Isto não acontece na parede esquerda onde os perfis conservam um comportamento praticamente plano, mostrando um leve crescimento em alguns casos. Esse comportamento deve-se, possivelmente, à condição de contorno de saída, que provoca um direcionamento do escoamento para a parede direita causando uma concentração de sólidos maior nessa região. Porém a causa física deste comportamento não está clara, pois é razoável esperar um tempo de duração maior também na parede direita onde os clusters devem ser maiores, em função da película anular de sólido que normalmente observa-se nestas instalações e mostrada na Figura 4. Não é possível comparar estes resultados aos de Sharma *et al.* visto terem assumido condição de simetria radial, além das condições de contorno de saída serem diferentes. Entretanto os resultados são contrários aos apresentados por estes autores. Para Sharma *et al.* o maior valor de  $\tau_c$  foi de 0,15 segundos a 4,5 metros de altura. No presente trabalho o maior valor de  $\tau_c$  nessa mesma altura foi de 4,0 segundos. Esta diferença significativa pode ser devido à natureza turbulenta do escoamento não considerada no presente trabalho. Há também que se considerar as incertezas nas medições experimentais, e as diferenças nas condições operacionais experimentais comparadas às de simulação. De qualquer forma, há necessidade de consideração da turbulência na simulação deste tipo de escoamento. O

valor médio de  $\tau_c$  na seção transversal,  $\langle \tau_c \rangle$ , também é mostrado na Figura 7 em função da altura. O tempo médio de duração dos "clusters" é inversamente proporcional às concentrações de sólido média no tempo e nos "clusters". Ou seja, quanto mais densos os "clusters" são, menor é o seu tempo de duração em termos dos valores médios na seção transversal. No caso dos valores locais destas variáveis observa-se o mesmo padrão de comportamento como visto nas Figuras 6 e 8 (quando H cresce  $\alpha_{sc}$  cai enquanto  $\tau_c$  cresce, exceto nos 5,5 metros onde  $\tau_c$  tem o mesmo comportamento de  $\alpha_{sc}$ ). Porém, na direção radial observa-se, em média, um comportamento inverso, i.e. quanto maior a concentração, maior o tempo de duração do "cluster" como percebe-se nas Figuras 6 e 8.

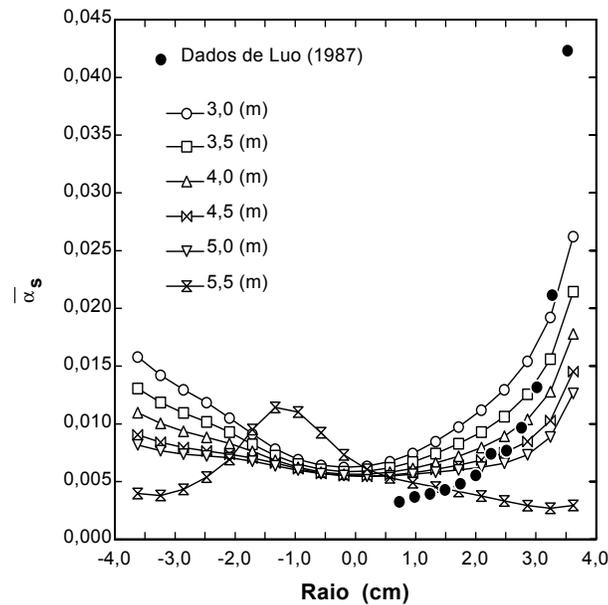


Figura 5. Perfis radiais da fração volumétrica de sólido média no tempo em várias seções transversais da coluna, em comparação com resultados experimentais de Luo (1987) obtidos a 3,4 metros acima da seção de entrada.

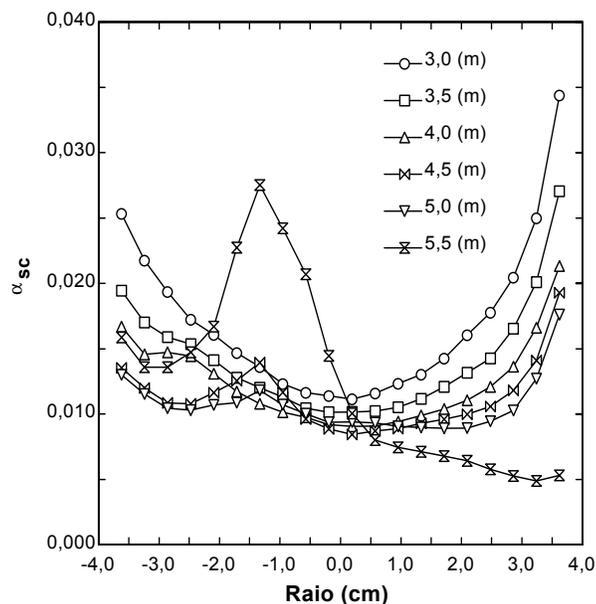


Figura 6. Perfis radiais da concentração média de sólido nos "clusters",  $\alpha_{sc}$ , em várias seções transversais da coluna.

A Figura 9 mostra a fração de tempo de existência de "clusters" em cada posição radial  $F_c$  para várias seções transversais do leito. Pode-se observar uma diferença máxima de aproximadamente 4 vezes entre os valores de  $F_c$  obtidos (mínimo de 0,06 e máximo de 0,24), sendo que a maioria dos pontos oscilam entre 0,12 e 0,20. Não se vislumbra qualquer padrão de variação funcional de  $F_c$  com o raio em função da altura. A Figura 10 mostra a fração de tempo de existência de

"clusters" média na seção em função da altura da coluna. Neste caso os resultados oscilam numa faixa entre 0,13 e 0,20, em torno do valor médio de aproximadamente 0,17. Este valor médio de  $\langle F_c \rangle$  também foi obtido por Sharma *et al.* (2000). Segundo estes autores esta característica apresenta uma constância inexplicável até o momento, mesmo quando a velocidade superficial de entrada do gás e o diâmetro de partícula médio são variados consideravelmente. O valor médio por eles calculado foi de 0,17, o qual poderia ser assumido aqui também para toda a coluna.

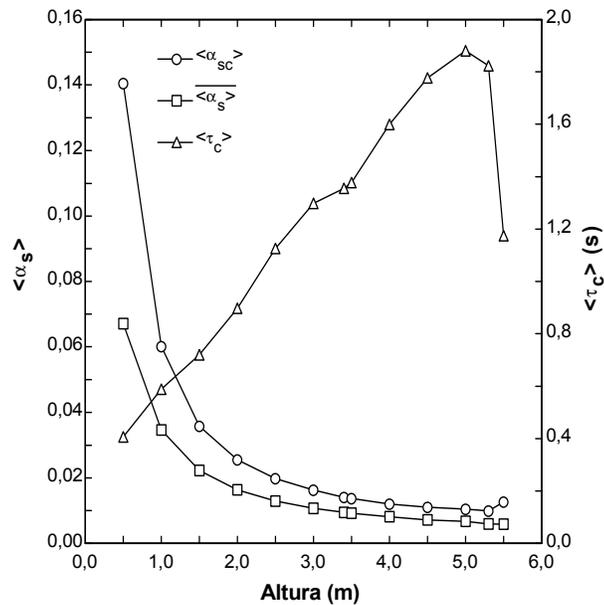


Figura 7. Comparação dos perfis médios na seção transversal da fração volumétrica de sólido média no tempo,  $\langle \bar{\alpha}_s \rangle$ , da concentração média de sólido nos clusters,  $\langle \alpha_{sc} \rangle$ , e do tempo de duração dos clusters,  $\langle \tau_c \rangle$  ao longo da coluna.

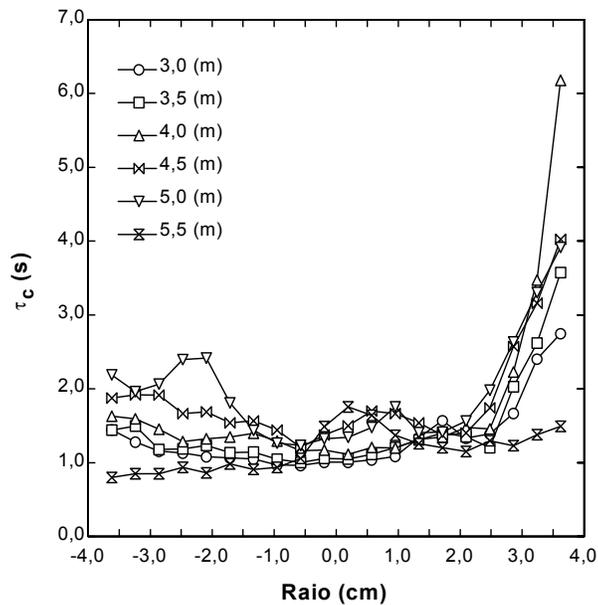


Figura 8. Perfis radiais do tempo de duração dos "clusters",  $\tau_c$  em várias seções transversais do leito.

Nas Figuras 11 e 10 apresenta-se a frequência de ocorrência dos "clusters"  $N_c$  em função do raio em varias alturas do leito e o valor médio na seção desta frequência de ocorrência  $\langle N_c \rangle$  em função da altura do leito, respectivamente. Nestes casos observa-se uma variação um pouco maior desta propriedade em comparação com  $F_c$ . A maior quantidade de "clusters" obteve-se na parte inferior do leito, sendo de cerca de 0,07 na metade e na parte superior da coluna. Da Figura 11 pode-se notar que a frequência maior de ocorrência dos "clusters" para a metade superior da coluna acontece aos 5,5 metros de altura sendo de aproximadamente 0,15 "clusters" por segundo. Este valor é muito baixo quando comparado aos dados de

Sharma *et al.* (2000), que obtiveram quase 12 "clusters" por segundo para um valor da velocidade superficial do gás na entrada de 4,9 m/s. Novamente, essa discrepância pode estar relacionada ao fato de se ter utilizado modelo laminar, à incertezas nos resultados experimentais de Sharma *et al.*, e as diferenças entre as condições operacionais experimentais e de simulação. Na presente simulação laminar, a frequência de ocorrência é baixíssima e o tempo de existência é elevado em comparação com as medições experimentais de Sharma *et al.* (2000), e em comparação com resultados de simulação numérica de Helland *et al.* (2002), onde foi considerada turbulência nas equações da fase gasosa. Evidencia-se a necessidade de consideração da turbulência no sistema de equações governantes e também, na opinião dos autores, de realização de novos trabalhos onde se quantifiquem estas propriedades através de outro método experimental para medição de  $\alpha_s$ .

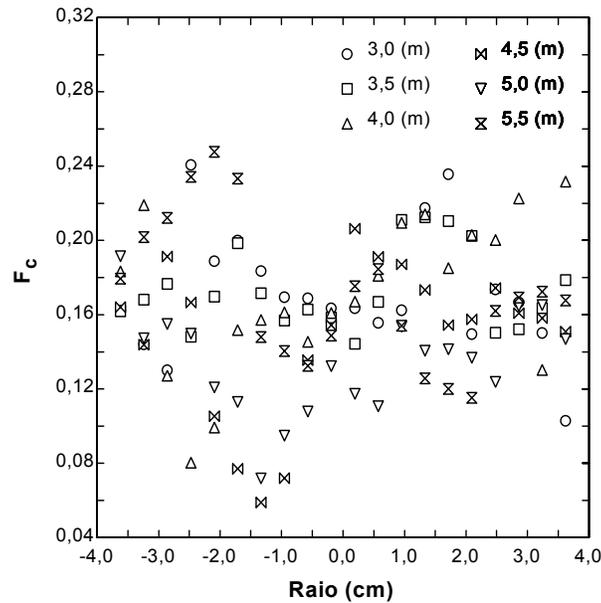


Figura 9. Fração de tempo de existência dos "clusters" em cada posição radial,  $F_c$ , para várias seções transversais do leito.

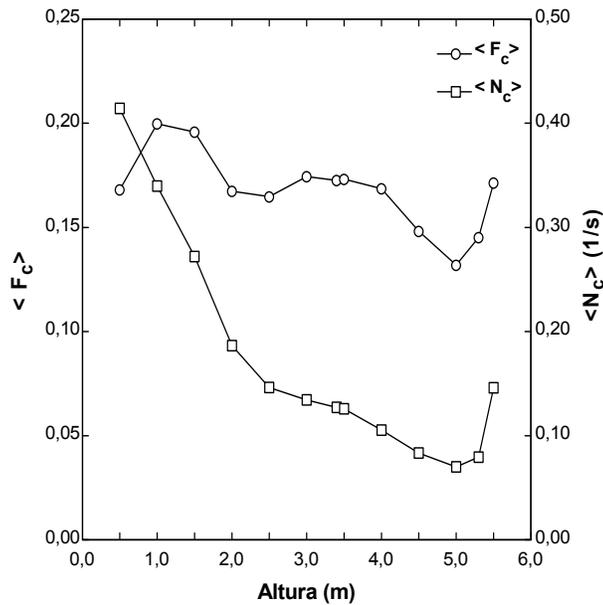


Figura 10. Valores médios na seção da fração de tempo de existência dos clusters,  $\langle F_c \rangle$ , e da frequência de ocorrência de clusters,  $\langle N_c \rangle$ , em função da altura da coluna.

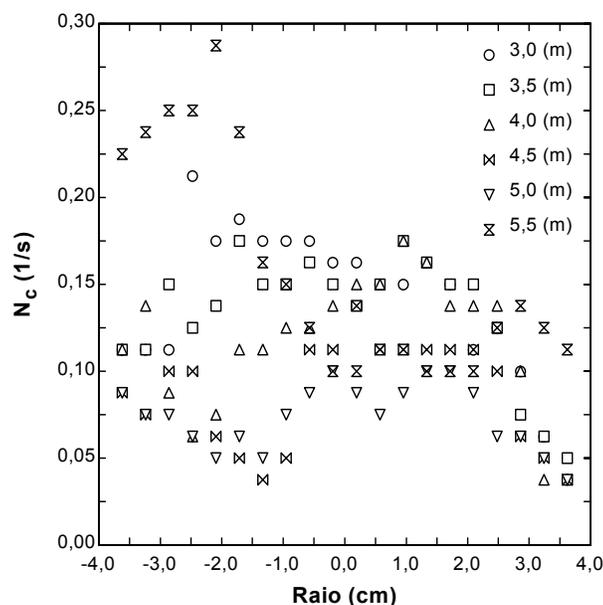


Figura 11. Variação radial da frequência de ocorrência de clusters,  $N_c$ , em várias seções transversais do leito.

## 5. Conclusões

Os resultados de simulação apresentados mostram que o modelo matemático empregado é capaz de prever o comportamento hidrodinâmico do escoamento médio em comparação com os dados experimentais de forma razoável. Comprovou-se que o uso da metodologia de identificação e caracterização das estruturas coerentes permite analisar qualitativa e quantitativamente fenômenos importantes destes escoamentos. Foi mostrado que o modelo laminar capta uma quantidade de clusters muito menor caracterizados por um tempo de duração muito maior em comparação com dados experimentais da literatura. As discrepâncias podem estar relacionadas a incertezas experimentais e a diferenças de condição operacionais entre experimento e simulação. Porém, avalia-se que a razão principal destas diferenças parece ser a natureza turbulenta deste tipo de escoamento que não foi incorporada no modelo. Isto indica a necessidade de utilização de modelos de turbulência na formulação de escoamentos gás-sólido em colunas de leito circulante.

## 6. Agradecimentos

Este trabalho recebeu o suporte da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) através da bolsa de doutorado (processo 98/13812-1) para o primeiro autor.

## 7. Referencias Bibliográficas

- Agrawal, K., Loezos, P.N., Syamlal, M. and Sundaresan, S., 2001, "The Role of Meso-Scale Structures in Rapid Gas-Solid Flows", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.445, pp. 151-185
- Büssing, W. and Reh, L., 2001, "On Viscous Momentum Transfer by Solids in Gas-Solids Flow through Risers", *Chemical Engineering Science*, Vol.56, pp. 3803-3813.
- Cabezas-Gómez, L. e Milioli, F.E., 2002, "A Parametric Study of the Gas-Solid Flow in the Riser of a Circulating Fluidized Bed Through Continuous Eulerian Modeling", Submitted to the *Powder Technology*.
- Cabezas-Gómez, L. and Milioli, F.E., 2001, "Gas-Solid Two-phase Flow in the Riser of Circulating Fluidized Bed: Mathematical Modeling and Numerical Simulation", *RBCM- J. of the Brazilian Soc. Mechanical Sciences*, Vol.19, No. 3, pp. 332-340.
- Davidson, J.F., 2000, "Circulating Fluidized Bed Hydrodynamics", *Powder Technology*, Vol.113, pp. 249-260.
- Ding, J. and Gidaspow, D., 1990, "A Bubbling Model using Kinetic Theory of Granular Flow", *AIChE Journal*, Vol.36, No. 4, pp. 523-538.
- Enwald, H., Peirano, E. and Almstedt, A.-E., 1996, "Eulerian Two-phase Flow Theory Applied to Fluidization", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.22, Supplement, pp. 21-66.
- Ergun, S., 1952, "Fluid Flow through Packed Columns", *Chemical Engineering Progress*, Vol.48, No. 2, pp. 89-94.
- Gidaspow, D., 1994, "Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions", Academic Press, Boston, 468p.

- Helland, E., Occelli, R. and Tadrist, L., 2000, "Numerical Study of Cluster Formation in a Gas-Particle Circulating Fluidized Bed", Powder Technology, Vol.110, pp. 210-221.
- Helland, E., Occelli, R. and Tadrist, L., 2002, "Computational study of Fluctuating Motions and Cluster Structures in Gas-Particle Flows", International Journal of Multiphase Flow, Vol.28, pp. 199-223.
- Horio, M. and Clift, R., 1992, "A Note on Terminology: 'Clusters' and 'Agglomerates'" Powder Technology, Vol.70, pp. 196.
- Horio, M. and Kuroki, H., 1994, "Three-Dimensional Flow Visualization of Dilutely Dispersed Solids in Bubbling and Circulating Fluidized Beds", Chemical Engineering Science, Vol.49, pp. 2413-2421.
- Hoomans, B.P.B., Kuipers, J.A.M. and Van Swaaij, W.P.M., 1998, "Granular Dynamics Simulation of Cluster Formation in Dense Riser Flow", In: 3<sup>rd</sup> International Conference on Multiphase Flow, Lyon, France, pp.2.7-9.
- Jayaswal, U., 1991, "Hydrodynamics of Multiphase Flows: Separation, Dissemination and Fluidization", PhD Thesis, Illinois Institute of Technology, Chicago.
- Lackermeier, U., Rudnick, J., Werther, J., Bredebusch, A. and Burkhardt, H., 2001, "Visualization of Flow Structures Inside a Circulating Fluidized Bed by Means of Laser Sheet and Image Processing", Powder Technology, Vol.114, pp. 71-83.
- Luo, K.M., 1987, "Dilute, Dense-Phase and Maximum Solids-Gas Transport", PhD Thesis, Illinois Institute of Technology, Chicago.
- Ouyang, J. and Li, J., 1999, "Discrete Simulations of Heterogeneous Structure and Dynamic Behavior in Gas-solid Fluidization", Chemical Engineering Science, Vol. 54, pp. 5427-5440.
- Sharma, A.K., Tuzla, K., Matsen, J. and Chen, J.C., 2000, "Parametric effects of particle size and gas velocity on cluster characteristics in fast fluidized beds", Powder Technology, Vol.111, pp. 114-122.
- Tsukada, M., Ito, M., Kamiya, H. and Horio, M., 1997, "Three-Dimension Imaging of Particle Clusters in Dilute Gas-Solid Suspension Flow", The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol.75, pp. 466-470.
- Tsuo, Y., 1989, "Computation of Flow Regimes in Circulating Fluidized Beds", PhD Thesis, Illinois Institute of Technology, Chicago.
- Tsuo, Y.P. and Gidaspow, D., 1990, "Computation of Flow Patterns in Circulating Fluidized Beds", AIChE Journal, Vol.36, No. 6, pp. 885-896.
- Tuzla, K., Sharma, A.K., Chen, J.C., Schiewe, T., Wirth, K.E. and Molerus, O., 1998, "Transient dynamics of solid concentration in downer fluidized bed", Powder Technology, Vol.100, pp. 166-172.
- Wen, C.Y. and Yu, Y.H., 1966, "Mechanics of Fluidization", Chemical Engineering Progress Symposium Series, Vol.62, No. 62, pp. 100-111.

## **AN ANALYSIS OF IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF CLUSTERS IN THE RISER OF A CIRCULATING FLUIDIZED BED FROM NUMERICAL SIMULATION RESULTS**

### **Luben Cabezas Gómez**

Group of Thermal and Fluids Engineering - EESC-USP, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590 - São Carlos - SP.  
[lubencg@sc.usp.br](mailto:lubencg@sc.usp.br)

### **Luciano Vieira de Souza**

Group of Thermal and Fluids Engineering EESC-USP, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590 - São Carlos - SP.  
[souzalv@sc.usp.br](mailto:souzalv@sc.usp.br)

### **Fernando Eduardo Milioli**

Group of Thermal and Fluids Engineering EESC-USP, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590 - São Carlos - SP.  
[milioli@sc.usp.br](mailto:milioli@sc.usp.br)

***Abstract.** A methodology of identification and characterization of coherent structures mostly known as clusters is applied to hydrodynamic results of numerical simulation generated for the riser of a circulating fluidized bed. The numerical simulation is performed using the MICEFLOW code, which includes the two-fluids IIT's hydrodynamic model B. The methodology for cluster characterization that is used is based in the determination of four characteristics, related to average life time, average volumetric fraction of solid, existing time fraction and frequency of occurrence. The identification of clusters is performed applying a criterion related to the time average value of the volumetric solid fraction. A qualitative rather quantitative analysis is performed mainly owing to the unavailability of operational data used in the considered experiments. Concerning qualitative analysis, the simulation results are in good agreement with literature. Some quantitative comparisons between predictions and experiment were also presented to emphasize the capability of the modeling procedure regarding the analysis of macroscopic scale coherent structures.*

**Keywords.** coherent structures, clusters, numerical simulation, gas-solid flow, circulating fluidized bed.