

PREVISÃO DA MISTURA DE SÓLIDOS PARTICULADOS EM LEITO FLUIDIZADO

Geraldo Luiz Palma
Augusto Ronchi Junior
Paulo Cezar Razuk
Célio Losnak

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Eng. Luiz. E. C. Coube, s/n, 17033-360, Bauru, SP, Brasil. E-mail: glpalma@bauru.unesp.br

Resumo. Apesar da importância da mistura de sólidos particulados a literatura nacional apresenta uma lacuna sobre o assunto. Leitos fluidizados borbulhantes gasosos tem sido aplicados pela capacidade em promover o contato entre partículas. Os leitos fluidizados são assumidos como tendo fases de bolha e de emulsão. O desenvolvimento das bolhas e sua interação com a emulsão são determinantes na eficiência do processo. Realizou-se revisão sobre mistura em geral e especificamente para leito fluidizado considerou-se o modelo de segregação e mistura de Gibilaro-Rowe. No modelo os sólidos estão em duas fases, esteiras das bolhas e emulsão. Os parâmetros do modelo são as taxas de dispersão axial, segregação na emulsão, circulação em ambas as fases e intercâmbio entre as fases, dependentes de variáveis do processo. Nesse trabalho as previsões do modelo para a fração de partículas menos fluidizáveis na fase de emulsão foram comparadas com dados experimentais.

Palavras-chave: Fluidização, Mistura, Segregação, Leito fluidizado

1. INTRODUÇÃO

Inúmeros processos industriais necessitam misturar ou separar sistemas particulados sólidos, quer como uma operação complementar quer como operação principal.

Gourdon *et al.* (1988) mostraram os possíveis estados de uma mistura, partindo-se normalmente de uma condição estratificada chegando-se à uma condição ideal, o que é praticamente impossível. A figura 1 mostra os possíveis estados de uma mistura binária.

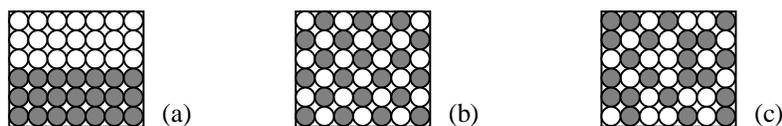


Figura 1 – Possíveis estados de mistura: (a) estratificado, (b) ordenado (c) aleatório.

Para Poux *et al.* (1991) o objetivo de uma operação de mistura, idealmente, é obter uma distribuição na qual cada partícula de um componente está ao lado de uma partícula de outro componente, no caso de um sistema binário.

Fan & Chen (1990) informam que o termo “homogeneidade” é de difícil definição e não é adequado nem suficiente para qualificar uma mistura, o que depende da natureza do sistema particulado e da finalidade do produto final. Para avaliar a homogeneidade algum critério deve ser definido.

Ao iniciar estudo em fluidização foi proposta a verificação do modelo de Gibilaro – Rowe para previsão de concentração de partículas ao longo da altura do leito.

A literatura tem mostrado que a mistura ou segregação dentro de um leito fluidizado é promovida pela passagem de bolhas através do leito de partículas.

Ao subir pelo leito as bolhas formadas carregam nas respectivas esteiras partículas das regiões inferiores para as regiões superiores. Também são movimentadas partículas na parte frontal das bolhas que ao chegarem na superfície são espalhadas. Partículas mais pesadas tendem a descer através do leito devido à vazios deixados pelo deslocamento das bolhas. Esses fenômenos associados são os promotores da mistura ou segregação no leito fluidizado.

Com a movimentação do leito provocado pela elevação da bolha no leito produz-se um perfil de concentrações ao longo da altura, caracterizando, após determinado período, num índice de mistura. Esse perfil pode apresentar-se num dos tipos mostrados na figura 2 dependendo da natureza dos particulados e das condições de operação.

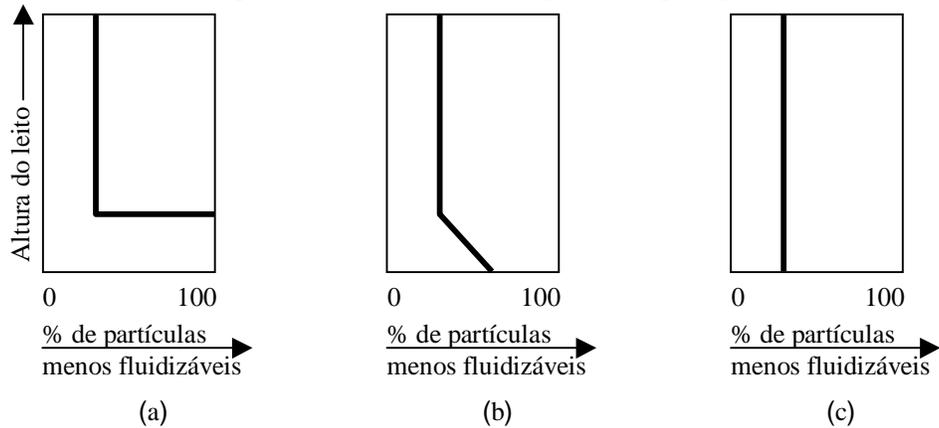


Figura 2 – Perfis produzidos em diversas situações de fluidização. (a) sistema fortemente segregado, (b) caso intermediário, (c) mistura perfeita.

2. MODELO DE GIBILARO & ROWE

O modelo para segregação ou mistura proposto por Gibilaro & Rowe (1974), utiliza quatro mecanismos; três para descrever a mistura e um para a segregação. Esses mecanismos são: a circulação, o intercâmbio, a mistura axial e a segregação. A figura 3 esquematiza os quatro mecanismos.

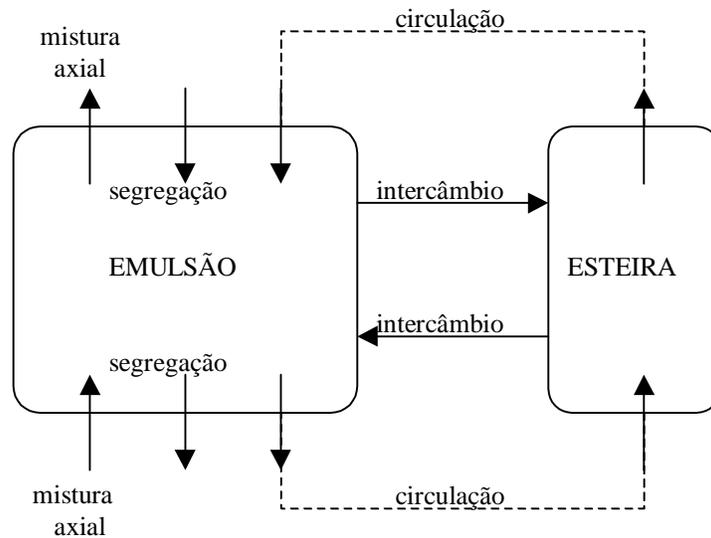


Figura 3 – Representação dos mecanismos do modelo de Gibilaro – Rowe.

Para esse modelo foram definidos quatro parâmetros com base na área da seção transversal da fase de emulsão:

- taxa constante de dispersão axial (T_{DA});
- taxa constante de segregação (T_{SE});
- taxa de circulação (T_{CI}) nas fases, ascendente nas esteiras e descendente no topo;
- taxa constante de intercâmbio entre as fases (T_{IN}).

Foram previstas três formas distintas de atuação do modelo de segregação ou mistura chamadas pelos autores de “casos”;

Caso 1 : Sistemas fortemente segregados.

Caso 2 : Efeito adicional do intercâmbio entre fases.

Caso 3 : Efeito adicional da mistura axial na fase de emulsão.

No caso 1 consideraram apenas os mecanismos de circulação e segregação, sendo um de mistura e outro de segregação.

No caso 2 levaram em conta os mecanismos de circulação, de segregação e de intercâmbio, sendo dois de mistura e um de segregação.

No caso 3 propuseram os mecanismos de circulação, de segregação e de mistura axial, sendo dois de mistura e um de segregação.

Nesse trabalho o estudo baseou-se no caso (2) do modelo de Gibilaro-Rowe o qual despreza o parâmetro de dispersão axial (T_{DA}) na fase de emulsão, justificado pelos autores por não haver razão física para sua inclusão. Trabalhos experimentais mostram que a dispersão axial das partículas mais densas não ocorre na fase de emulsão do leito.

Gibilaro & Rowe propuseram equações para prever o movimento das partículas menos fluidizáveis nas fases de emulsão e de esteira.

No caso (2) do modelo os perfis de concentração das partículas mais densas ou menos fluidizáveis e da fase de esteira na parte mais alta do leito contendo ambas espécies de sólidos, são fornecidos respectivamente por:

$$\left(\frac{C_B}{C_{B0}} \right)^{1+\lambda} \left(\frac{1-C_B}{1-C_{B0}} \right)^{1-\lambda} = e^{-\gamma z} \quad (01)$$

z é a altura adimensional em relação ao fundo do leito ($z=h/H$)

h é a altura dos pontos de coleta das amostras

H é a altura total do leito de partículas

C_B é a fração em volume das partículas menos fluidizáveis na emulsão

C_{B0} é a fração de partículas menos fluidizáveis na emulsão no fundo do leito ou lâmina

λ é definido na equação 03 e γ é definido na equação 04

e

$$C_w = C_B + \frac{C_B(1-C_B)}{\lambda} \quad (02)$$

C_w é a fração em volume das partículas menos fluidizáveis nas esteiras das bolhas

$$\lambda = \frac{T_{CI}}{T_{SE}} \quad (03)$$

$$\gamma = \frac{T_{IN}}{T_{CI}} H \quad (04)$$

2.1 – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO

Como consequência de considerações feitas pelos autores do modelo, o caso 1 tem apenas o parâmetro λ e o caso 2 tem os parâmetros λ e γ .

Naimer *et al.* (1982) determinaram os parâmetros do modelo de Gibilaro – Rowe, T_{CI} , T_{SE} , T_{IN} e T_{DA} , em função das condições de operação do leito, do sistema de partículas e da formação e desenvolvimento das bolhas.

O leito foi dividido em lâminas horizontais de alturas iguais conforme a figura 4 e um método iterativo verificou a convergência para prever o padrão de segregação ou mistura.

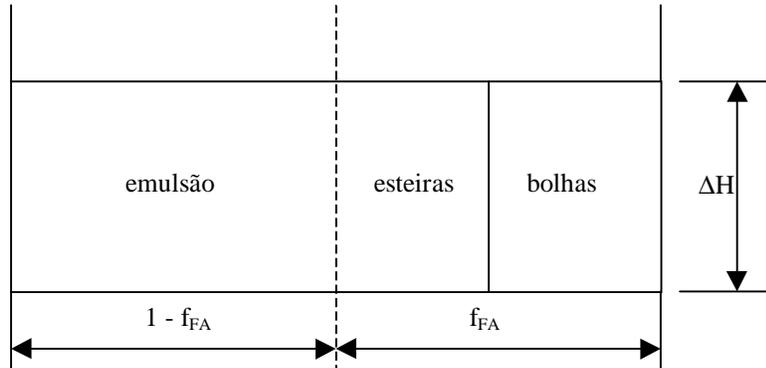


Figura 4 – Área da seção transversal de bolhas e esteiras.

f_{FA} é a fração de esteiras e bolhas no leito

ΔH é a altura de uma lâmina do leito

O leito fluidizado deve ser mantido em condições de operação que favoreçam mistura ou segregação adequadas, dependendo da utilização, pois a competição entre os dois mecanismos leva a uma diferença de composição ao longo da altura do leito.

Parâmetro taxa de circulação (T_{CI})

Pode ser relacionada às condições de operação através do balanço do fluxo de sólidos ascendentes e descendentes no interior do leito, sendo determinada por,

$$T_{CI} = U_{BL} \cdot F_{WB} \left(\frac{f_{FA}}{1 - f_{FA}} \right) \quad (05)$$

U_{BL} é a velocidade de subida da bolha

F_{WB} é a fração de esteira em relação à soma de esteira e bolha

$$F_{WB} = \frac{1}{2} - \frac{9}{16} \cos \frac{\theta_{WK}}{2} + \frac{1}{16} \cos \frac{3\theta_{WK}}{2} \quad (06)$$

θ_{WK} é o ângulo da esteira

$$f_{FA} = \frac{U_{FL} - U_{MF}}{U_{BL} (1 - F_{WB})} \quad (07)$$

U_{FL} é a velocidade de fluidização

U_{MF} é a velocidade de mínima fluidização

$$\theta_{WK} = 160 - 160 \exp(-60 \cdot d_{BL}) \quad (08)$$

d_{BL} é o diâmetro da bolha

Parâmetro taxa de intercâmbio (T_{IN})

Determinada através do fluxo de sólidos entrando e saindo da esteira. Por hipótese, é assumido que o fluxo de partículas para a esteira é proporcional tanto à fração em volume da esteira, quanto ao fluxo de partículas na nuvem de gás na superfície frontal da bolha. Com base na fase de emulsão, a taxa de intercâmbio resultou em:

$$T_{IN} = \frac{3 F_{WB} U_{MF}}{2 d_{BL} \varepsilon_{MF}} \left(\frac{f_{FA}}{1 - f_{FA}} \right) \quad (09)$$

ε_{MF} é a porosidade na condição de mínima fluidização

Parâmetro taxa de segregação (T_{SE})

Pode ser considerado como o fluxo líquido descendente, por unidade de área da seção transversal da fase de emulsão, das partículas menos fluidizáveis em relação às mais fluidizáveis. Foi determinado por:

$$T_{SE} = \frac{3}{4} Y_{DS} \cdot U_{BL} \left(\frac{f_{FA}}{1 - f_{FA}} \right) \quad (10)$$

Y_{DS} é a distância adimensional de segregação

Tanimoto *et al.* (1981) observaram que a segregação ocorre na direção vertical, principalmente quando existem diferenças razoáveis na densidade e no tamanho das partículas. Sob condições de operação do leito, a comprovação da ocorrência de segregação pode ser feita pelo exame do perfil vertical de concentrações dos componentes.

Existem na literatura várias expressões para a distância de segregação adimensional, Tanimoto *et al.* (1981) recomendam a equação:

$$Y_{DS} = 0,6 \left(\frac{\rho_{PJ}}{\rho_{PF}} \right) \left(\frac{d_{PJ}}{d_{PF}} \right)^{1/3} \quad (11)$$

ρ_{PJ} é a massa específica das partículas menos fluidizáveis

ρ_{PF} é a massa específica das partículas mais fluidizáveis

d_{PJ} é o diâmetro das partículas menos fluidizáveis

d_{PF} é o diâmetro das partículas mais fluidizáveis

Hoffmann *et al.* (1993) apresentaram um trabalho mostrando que o modelo de Gibilaro – Rowe, inicialmente proposto para um leito pobre em partículas menos fluidizáveis, poderia ser utilizado para leitos ricos nesse tipo de partículas.

Mostraram também que o modelo pode ser aplicado tanto para sistemas binários com diferenças de densidades quanto para sistemas com densidades semelhantes.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para realizar a parte experimental foi construído um leito fluidizado com diâmetro interno de 196mm e altura de 1000mm em aço inoxidável.

Foram utilizados dois sistemas particulados de areia e sal na realização dos experimentos. O primeiro com diâmetros médios de 225 μ m para a areia e de 450 μ m para o sal e o segundo com diâmetros médios de 450 μ m para a areia e de 450 μ m para o sal.

As proporções da areia e do sal usados foram respectivamente 6 kg e 2 kg, ou seja, 75% e 25% em todos os experimentos. A altura estática do leito foi de aproximadamente 190mm.

As velocidades de fluidização utilizadas para o sistema com areia de diâmetro médio 225 μ m e sal com 450 μ m foram 0,13m/s, 0,15m/s e 0,18m/s. Para o sistema com areia de diâmetro médio 450 μ m e sal com 450 μ m as velocidades foram 0,28m/s, 0,34m/s e 0,40m/s.

Amostras foram retiradas em várias posições do leito e em vários tempos de fluidização. Cada posição de coleta das amostras é representada pela distância adimensional (z) que é a razão entre a altura de coleta (h) e a altura total do leito de partículas (H). As concentrações de areia e sal nas amostras foram determinadas por dissolução do sal. Uma descrição completa dos experimentos pode ser encontrada em Palma (1998).

Para os cálculos da concentração das partículas menos fluidizáveis na emulsão (C_B) partiu-se dos parâmetros λ , γ , C_{BO} e z , experimentais, substituindo-os na Eq. (01) adotando um procedimento iterativo. Calculou-se o lado direito da Eq. (01) para um determinado valor de z e C_{BO} . Atribuiu-se os valores para C_B nos dois termos do lado esquerdo da mesma equação até convergirem para o valor do lado direito.

No caso de C_W , Eq. (02), seu valor pode ser verificado apenas teoricamente uma vez que esse tipo de experimentação não permitiu sua avaliação para comparação. Esse termo tem influência mínima nos resultados pois o material carregado nas esteiras é pequeno.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 1 resume os resultados obtidos com o modelo de Gibilaro - Rowe e mostra que o valor experimental desvia do modelo no máximo em 15% para essa série de ensaios, sendo que o desvio médio ficou em 7,4% abaixo dos experimentos.

Tabela 1. Comparação de resultados utilizando o modelo e o experimento.

Diâmetro médio das partículas (μm)	Velocidade fluidização (m/s)	Altura adimensional (z)	λ (adimensional)	γ (adimensional)	C_B experimento (%)	C_B modelo (%)	Desvio (%)
225 /450	0,13	0,55	4,351	3,367	78,98	69,54	13,57
225 /450	0,13	0,89	6,874	3,702	69,87	69,17	01,01
225 /450	0,15	0,55	6,047	2,295	72,01	68,77	04,71
225 /450	0,15	0,89	8,311	2,564	71,86	65,86	09,11
225 /450	0,18	0,55	7,036	1,824	72,41	70,23	03,10
225 /450	0,18	0,89	9,061	2,023	73,42	68,07	07,86
450 /450	0,28	0,55	6,061	3,614	74,16	66,50	11,52
450 /450	0,28	0,89	7,475	3,801	73,81	64,04	15,25
450 /450	0,34	0,55	7,710	2,405	74,84	71,27	05,00
450 /450	0,34	0,89	8,298	2,585	74,91	68,94	08,66
450 /450	0,40	0,55	8,869	1,763	75,36	73,00	03,23
450 /450	0,40	0,89	8,702	1,910	75,42	71,33	05,73

A figura 5 representa a variação das concentrações de areia em função das velocidades de fluidização para uma altura adimensional de 0,55. A figura mostra concordância entre o modelo e o experimento principalmente em velocidades maiores de fluidização.

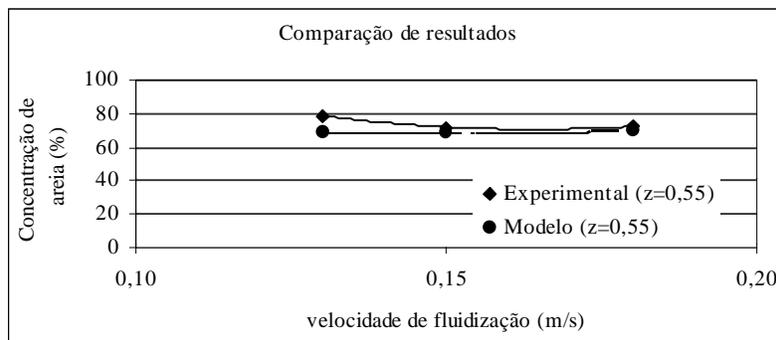


Figura 5 – Experimentos realizados com areia 225 μm e sal 450 μm .

A figura 6 é semelhante à figura anterior, concentrações de areia em função das velocidades de fluidização, agora para uma altura adimensional de 0,89 do mesmo ensaio. Também é observado concordância entre o modelo e o experimento. Houve, nesse caso desvio, maior nas maiores velocidades de fluidização.

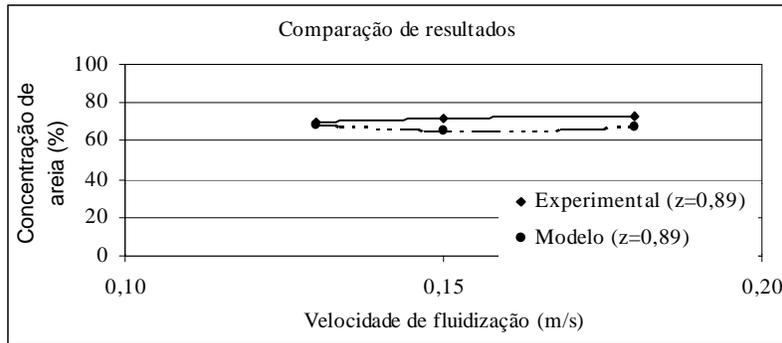


Figura 6 – Experimentos realizados com areia 225 μm e sal 450 μm .

A figura 7 mostra o mesmo tipo de variação das figuras 5 e 6 para velocidades de fluidização mais elevadas. A altura adimensional (z) é de 0,55. Como nas figuras anteriores a concordância entre o modelo e o experimento é visível.

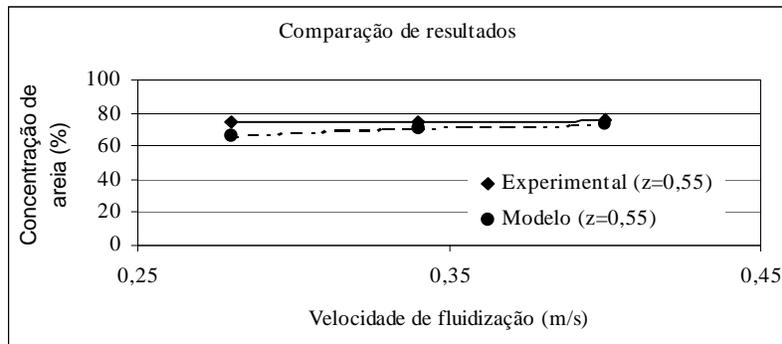


Figura 7 – Experimentos realizados com areia 450 μm e sal 450 μm .

A figura 8 é semelhante à figura anterior para uma altura adimensional de 0,89 do mesmo leito de partículas. Também é observado concordância entre o modelo e o experimento. Existe uma tendência de comportamento similar ao da figura 7.

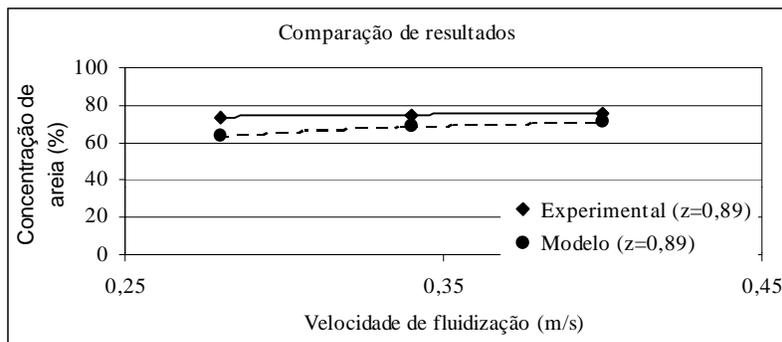


Figura 8 – Experimentos realizados com areia 450 μm e sal 450 μm .

5. CONCLUSÕES

Para os sistemas binários utilizados o modelo previu, com pequeno desvio, o comportamento do processo de mistura na fluidização.

Para as velocidades de fluidização mais elevadas o processo de mistura tende a ser mais eficiente.

Em relação à concentração ao longo da altura do leito, em $z = 0,55$ e $z = 0,89$, o processo com maiores velocidades tem comportamento mais similar que em menores velocidades.

A semelhança de comportamento mostrado nos ensaios com as maiores velocidades pode ser atribuído à maior movimentação do leito de partículas provocado pelas bolhas.

É necessário ainda a realização de novos experimentos para melhor avaliar o modelo em relação à outros sistemas particulados com diferenças de tamanho e densidade além de outras condições de fluidização.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a colaboração da FUNDUNESP – Fundação para o desenvolvimento da Unesp.

7. REFERÊNCIAS

- Fan, L. T. & Chen, Y. M., 1990, Recent developments in solids mixing, Powder Technology, vol. 61, pp. 255-287.
- Gibilaro, L. G. & Rowe, P. N., 1974, A model for a segregating gas fluidised bed, Chemical Engineering Science, vol. 29, pp. 1403-1412.
- Gourdon, J. L., Charonnat, Y. and Robin, P., 1988, Évaluation par échantillonnage des procédés de mélange de grains, Bulletin Liaison Laboratoire des Ponts et Chaussées, vol. 153, pp. 117-121.
- Hoffmann, A. C., Janssen, L. P. B. M. and Prins, J., 1993, Particle segregation in fluidized binary mixtures, Chemical Engineering Science, vol. 48, pp. 1583-1592.
- Naimer, N. S., Chiba, T. and Nienow, A. W., 1982, Parameter estimation for a solid mixing / segregation model for gas fluidized beds, Chemical Engineering Science, vol. 37, pp. 1047-1057.
- Palma, G. L., 1998, Um estudo de mistura em leito fluidizado para sistemas particulados sólidos, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, São Paulo, Brasil.
- Poux, M., Fayolle, P., Bertrand, J., Bridoux, D. and Bousquet, J., 1991, Powder mixing: some practical rules applied to agitated systems, Powder Technology, vol. 68, pp. 213-234.
- Tanimoto, H., Chiba, S., Chiba, T. and Kobayashi, H., 1981, Jetsam descent induced by a single bubble passage in three-dimensional gas-fluidized beds, Journal of Chemical Engineering of Japan, vol. 14, n. 4, pp. 273-276.