

# Estudo fluidodinâmico e de secagem de um particulado coesivo em leito fluidizado agitado

Miriam Carla Bonicontró Ambrosio-Ugri<sup>1\*</sup> e Osvaldir Pereira Taranto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790 – Bl. D-90, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. <sup>2</sup>DTF/FEQ, Universidade Estadual de Campinas, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Caixa Postal 6066, 13083-970, Campinas, São Paulo, Brasil. \*Autor para correspondência. e-mail: miriamugri@uol.com.br

**RESUMO.** A aplicação do leito fluidizado convencional para materiais particulados coesivos apresenta uma certa limitação devido a formação de caminhos preferenciais do gás causando uma fluidização de baixa qualidade. Neste trabalho, estudou-se a possibilidade do uso de um sistema de agitação mecânica inserido no leito fluidizado, a partir do estudo da fluidodinâmica do leito fluidizado agitado mecanicamente com a obtenção da curva característica de fluidização. Em seguida, foi feito o estudo do processo de secagem de um material particulado (ácido 2-hidroxibenzóico), com  $d_p$  médio de aproximadamente 80  $\mu\text{m}$ , com característica coesiva quando úmido. Os resultados obtidos mostraram que a agitação melhora a distribuição dos sólidos no interior do leito e impede a formação de caminhos preferenciais do gás, e que o processo de secagem ocorre principalmente no período de taxa de secagem constante.

**Palavras-chave:** fluidodinâmica, secagem, material particulado, leito fluidizado.

**ABSTRACT.** A fluid dynamic and drying study of a cohesive particulate in agitated fluidized bed. The conventional fluidized bed application for cohesive particulate materials presents a certain limitation due to the formation of gas channeling and, therefore, the occurrence of low quality fluidization. In this work, the use of a mechanical agitation system inside the fluidized bed was studied, evaluating the fluid dynamic of the mechanically agitated fluidized bed. Next, a study about a drying process of a particulate material (2-hydroxybenzoic acid) was done, with a medium  $d_p$  of about 80  $\mu\text{m}$ , with cohesive characteristics when wet. The results show that the agitation improves the solids distribution inside the bed and block the gas channeling, and that the drying process occurs mainly in the constant drying rate period.

**Key words:** fluid dynamic, drying, particulate material, fluidized bed.

## Introdução

A secagem é uma operação na qual normalmente é descrito o processo de remoção térmica de substâncias voláteis (umidade) para produzir um produto sólido seco (Mujumdar e Menon, 1995), industrializado ou não, e para garantir sua conservação no armazenamento.

O processo de fluidização com ar quente é um grande atrativo para a secagem de pós e de produtos granulares úmidos. Essa técnica é usada industrialmente desde 1948, sendo atualmente muito popular na secagem de materiais triturados, areia, polímeros, produtos farmacêuticos, materiais cristalinos, entre outros (Reay, 1986).

Materiais orgânicos cristalinos, para serem comercializados e armazenados, precisam estar

dentro de uma faixa de umidade aceitável no mercado (para o material usado cerca de 2000 ppm), que não degrade nem diminua sua qualidade e seus aspectos visuais. Para atingir um determinado teor de umidade, é necessário que o material seja submetido a um processo de secagem, o que pode ser feito através de vários equipamentos comerciais disponíveis. Os equipamentos de secagem mais usados industrialmente são os secadores de bandeja, rotativos com aquecimento direto ou indireto, secadores flash ou pneumáticos, secadores de leito de jorro e os secadores de leito fluidizado.

O movimento dos materiais granulares em um secador, por meio da agitação mecânica do material dentro do leito, tem sido estudado para materiais que são difíceis de fluidizar ou que sejam sujeitos à formação de caminhos preferenciais do gás.

Reed e Fenske (1955) estudaram os efeitos da agitação mecânica na fluidização de sólidos e concluíram que o agitador auxilia no movimento dos materiais particulados dentro do leito, melhorando a fluidização em todo o volume do leito.

A utilização do leito fluidizado convencional na secagem de um material particulado coesivo é bastante limitada. Brekken *et al.* (1970) estudaram uma solução para a fluidização de farinha de trigo úmida e utilizaram um agitador mecânico de baixa rotação localizado logo acima do prato distribuidor. Sem o uso do agitador, a farinha de trigo úmida não fluidizava devido à formação de caminhos preferenciais e aos aglomerados das partículas; com o uso do agitador, verificaram que os caminhos preferenciais eram quebrados e as partículas eram melhor distribuídas no escoamento do gás, sendo possível a fluidização.

Neste trabalho, fez-se um estudo da secagem de um ácido orgânico cristalino com características coesivas quando úmido, utilizando um leito fluidizado modificado pela adição de um sistema de agitação mecânica. Por meio de testes preliminares, foi verificada a ocorrência de aglomeração do material e também a formação de caminhos preferenciais do gás, não possibilitando que as partículas entrassem no regime de fluidização (Ambrosio, 1999).

O trabalho foi dividido em duas etapas: na primeira, fez-se o estudo fluidodinâmico do leito fluidizado agitado mecanicamente usando um material isento de umidade, com o objetivo de compará-lo com o leito fluidizado convencional, além de ser verificado o desempenho da placa distribuidora. Na segunda etapa, fez-se o estudo da secagem do ácido orgânico cristalino com característica coesiva e obtiveram-se as curvas de secagem ( $X/X_0$  versus  $t$ ) e, conseqüentemente, as características e o regime de secagem do material.

## Material e métodos

### Material

Na primeira etapa do trabalho, correspondente à fluidodinâmica do leito fluidizado agitado, o material usado foi celulose microcristalina, isenta de umidade, com dois diâmetros médios de partícula, como descrito na Tabela 1.

**Tabela 1.** Características da celulose microcristalina.

| $d_p$ ( $\mu\text{m}$ ) | $\rho_s$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) |
|-------------------------|-------------------------------------|
| 203                     | 1,39                                |
| 360                     | 1,39                                |

Os experimentos fluidodinâmicos foram realizados com uma carga de sólidos igual a 1095 g, fornecendo alturas de leito fixo de 15 cm.

Para a segunda etapa do trabalho, foi realizada uma pesquisa no mercado de ácidos orgânicos de características cristalinas, entre eles: ácido tereftálico, ácido 2-hidroxibenzóico, ácido adípico, ácido oxálico e outros. Os resultados apresentados neste trabalho são representativos das corridas experimentais realizadas, e as características da partícula escolhida (ácido 2-hidroxibenzóico) estão apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2.** Características do ácido 2-hidroxibenzóico.

| $T_{\text{sublimação}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | $\rho_s$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | $d_p$ ( $\mu\text{m}$ ) |
|------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| 76                                             | 1,443                               | 80                      |

Uma vez que a sensibilidade térmica do ácido 2-hidroxibenzóico merece grande atenção, devido à sua temperatura de sublimação, as corridas experimentais de secagem foram realizadas a  $55^{\circ}\text{C}$ .

### Equipamento experimental e operação do sistema

O leito fluidizado utilizado nos experimentos foi construído em chapas de aço inox de 1,5 mm de espessura, 70 cm de altura na parte cilíndrica e 14,3 cm de diâmetro interno. Conectadas à secção cilíndrica, havia duas secções cônicas: uma com um ângulo externo de  $45^{\circ}$  e 5,2 cm de altura, e a outra com ângulo externo de  $60^{\circ}$  e 8,9 cm de altura. Acoplado no interior da base da secção cilíndrica, existia um prato distribuidor tipo prato perfurado, também confeccionado em aço inox. O sistema de agitação mecânica foi constituído por um motor com 1 hp de potência, por uma haste em aço inox e por um conjunto de pás em forma de âncora também em aço inox, localizado logo acima do prato distribuidor do gás. A Figura 1 apresenta a montagem experimental utilizada neste trabalho.

O módulo experimental também foi constituído por um soprador (1), responsável pela alimentação do ar que proporciona a fluidização no leito. O ar passava por um leito de sílica (7), responsável pela retirada de umidade do ar e, em seguida, por um aquecedor elétrico (8) onde era aquecido e ajustado na temperatura desejada. A vazão do ar era controlada por uma válvula globo (2) e medida por uma placa de orifício (5). Na parte inferior do leito foi instalado um psicrômetro (9), para medidas das temperaturas de bulbo úmido e de bulbo seco do ar, para se determinar a umidade de entrada do ar de secagem.

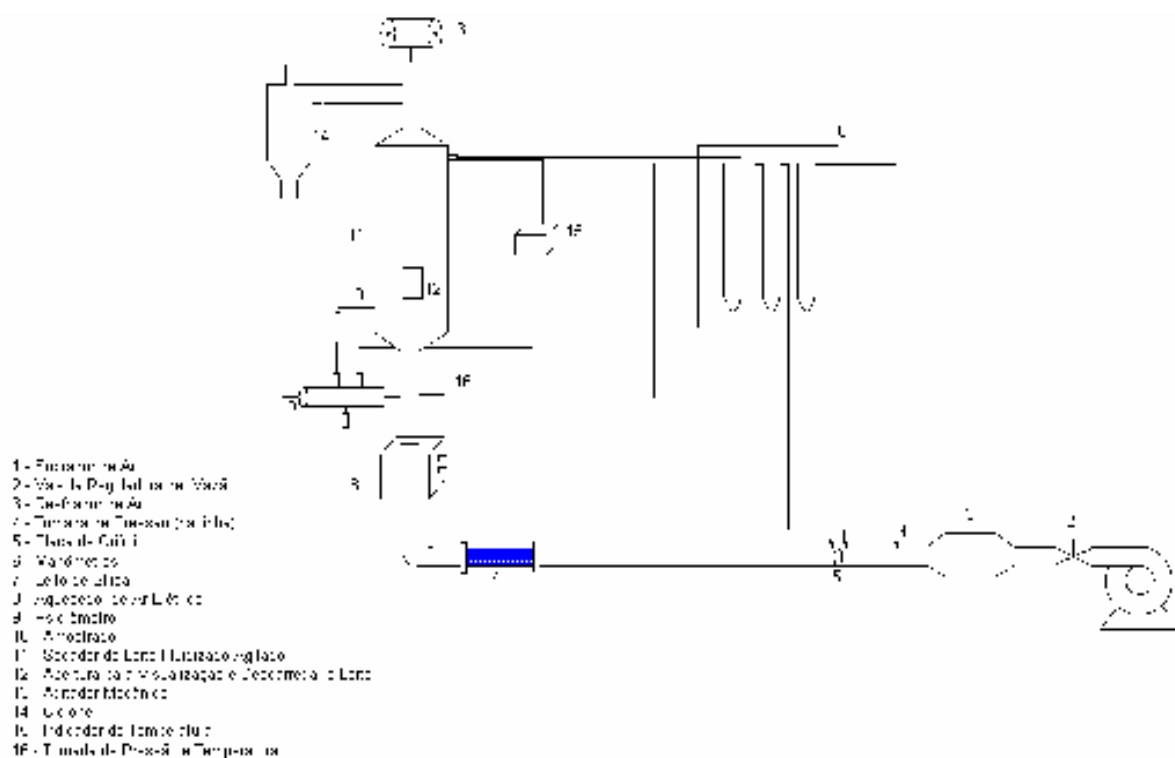


Figura 1. Esquema do sistema experimental.

A Figura 2 ilustra o leito fluidizado agitado, com suas dimensões, e mostra, esquematicamente, a localização e o formato do conjunto de pás do sistema de agitação.

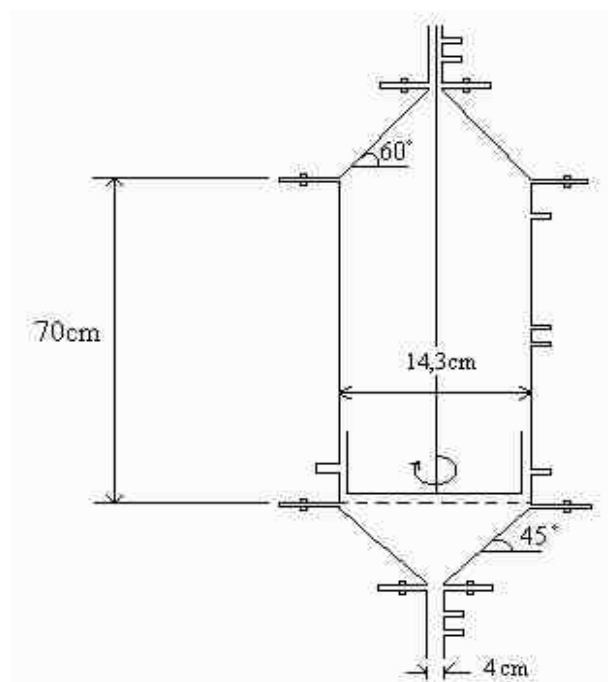


Figura 2. Leito fluidizado agitado.

### Estudo fluidodinâmico

Como pode ser observado no trabalho de Ambrosio (1999), a validação do equipamento em estudo utilizando as partículas de ácido 2-hidroxibenzóico úmidas foi impossível de ser realizada, devido a diversos problemas operacionais encontrados. Portanto a validação para determinação das curvas fluidodinâmicas foi realizada utilizando as partículas de celulose microcristalina. Apesar de elas terem diferentes características, os resultados encontrados foram bastante satisfatórios para a validação da fluidodinâmica do leito fluidizado agitado.

Para o estudo da fluidodinâmica do leito fluidizado agitado, o ar estava à temperatura ambiente. Os pontos experimentais foram determinados a partir da variação da vazão de ar e da queda de pressão no leito de partículas, traçando-se, em seguida, as curvas  $\Delta P$  versus  $Q$  para os ensaios com e sem agitação.

### Estudo da secagem do Ácido 2-hidroxibenzóico

No estudo da secagem do ácido 2-hidroxibenzóico, foram utilizados dois conteúdos de umidade inicial diferentes ( $X_0$  igual a 11% e 22%, em base seca), que foram determinados a partir dos lotes adquiridos para a realização deste trabalho.

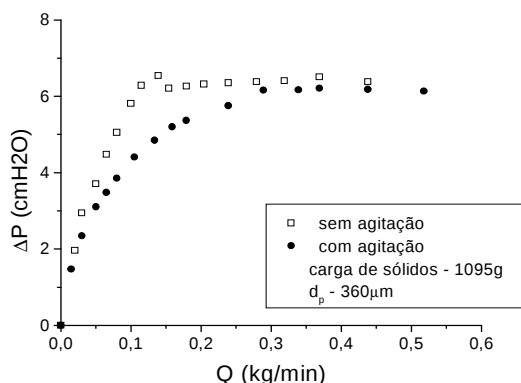
Além do conteúdo de umidade inicial do sólido, os outros parâmetros operacionais utilizados (estabelecidos após ensaios preliminares) foram: altura de leito fixo (H) de 7 cm, velocidade do gás de secagem ( $v_{\text{gás}}$ ) em torno de 0,3 m/s, tempo de agitação ( $t_{\text{agitação}}$ ) igual ao tempo do processo de secagem (90min para o menor  $X_0$  e 120min para o maior  $X_0$ ) e temperatura do gás ( $T_{\text{gás}}$ ) igual a 55°C. A temperatura do agente de secagem foi branda por causa da temperatura de sublimação do material, igual a 76°C, de forma a evitar sua sublimação durante a realização dos experimentos.

No decorrer dos experimentos, foram retiradas amostras para a análise da umidade. Eram feitas amostragens em determinados intervalos de tempo (5 minutos para 11%, base seca, e 7 minutos para 22%, base seca) e fez-se um teste gravimétrico em estufa a 40°C, por 24 horas. Com os valores de conteúdo de umidade obtidos, foram plotadas as curvas de secagem ( $X/X_0$  versus  $t$ ) para cada experimento realizado.

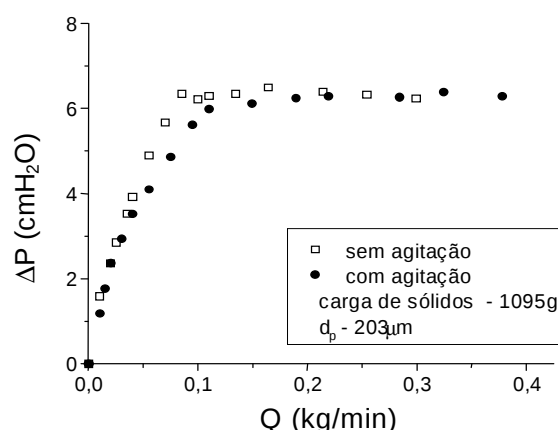
## Resultados

### Estudo fluidodinâmico

No estudo da fluidodinâmica do leito fluidizado agitado, pode-se notar, através dos gráficos apresentados nas Figuras 3 e 4, que foi possível a obtenção da fluidização clássica, mostrada pelas curvas de fluidização sem agitação. Com relação às curvas realizadas com agitação, observou-se que o leito entrou no regime de fluidização, sem passar pelo pico de queda de pressão máxima. Isso se deve ao fato de o gás não ter encontrado a resistência das partículas, como ocorre no leito convencional, devido ao movimento provocado pela agitação. As Figuras 3 e 4 ilustram esses comportamentos, que foram semelhantes em todas as corridas experimentais realizadas.



**Figura 3.** Curvas comparativas da fluidodinâmica do leito fluidizado convencional e do leito fluidizado agitado. Material utilizado: celulose microcristalina.

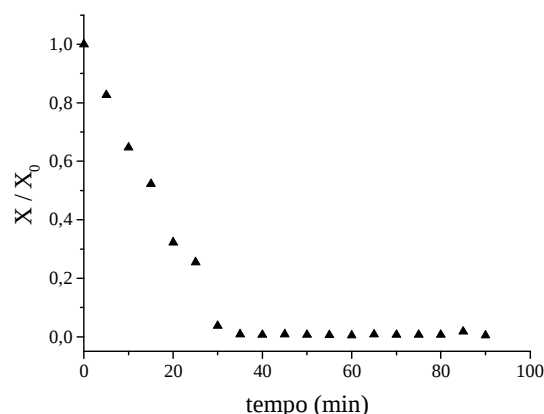


**Figura 4.** Curvas comparativas da fluidodinâmica do leito fluidizado convencional e do leito fluidizado agitado. Material utilizado: celulose microcristalina.

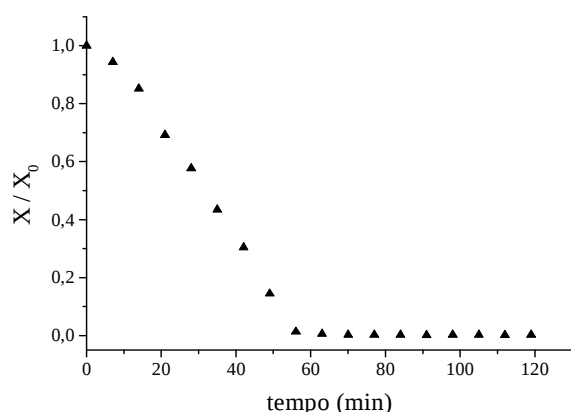
Esse estudo foi importante porque mostrou que o distribuidor de gás utilizado nos experimentos estava bem dimensionado para as partículas usadas e, também, que o uso do agitador não impedia que o leito entrasse no regime de fluidização, viabilizando o próximo passo do trabalho, que foi o estudo da secagem de um material particulado difícil de fluidizar em um leito fluidizado convencional.

### Estudo da secagem do Ácido 2-hidroxibenzóico

As Figuras 5 e 6 mostram os resultados obtidos para a secagem do ácido 2-hidroxibenzóico com característica coesiva, no leito fluidizado agitado. Nessas figuras, pode-se observar claramente a curva de secagem à taxa constante, nas condições do processo. A taxa de secagem constante significa que a quantidade de umidade removida diminui até um ponto em que toda a umidade superficial foi retirada e, a partir desse ponto, só existe a umidade intrínseca ao material, mais difícil e demorada de ser removida.



**Figura 5.** Curva de secagem do ácido 2-hidroxibenzóico.  $T_{\text{gás}} = 55^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{secagem}} = 90\text{min}$ ,  $v_{\text{gás}} = 0,3\text{ m/s}$ ,  $H = 7\text{ cm}$ ,  $X_0 = 11\%$ , base seca.



**Figura 6.** Curva de secagem do ácido 2-hidroxibenzóico.  $T_{\text{gás}} = 55^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{secagem}} = 120 \text{ min}$ ,  $v_{\text{gás}} = 0,3 \text{ m/s}$ ,  $H = 7 \text{ cm}$ ,  $X_0 = 22\%$ , base seca

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos durante o processo de secagem: o valor do conteúdo final de umidade ( $X_f$ ), fornecido em termos de % e ppm, para facilitar a comparação entre os valores iniciais e finais; o valor comercialmente aceito e os valores da taxa de secagem ( $-dX/dt$ ), para as duas corridas experimentais apresentadas nas Figuras 5 e 6. Nota-se que os valores do conteúdo de umidade final estão bem abaixo de 2000 ppm, que é o limite máximo de conteúdo de umidade aceito no mercado.

**Tabela 3.** Resultados obtidos na secagem.

| $X_0$ (% base seca) | $X_f$ (% base seca) | $X_f$ (ppm) | $(-dX/dt)$<br>[( $g_{\text{água}}/g_{\text{material seco}}$ )/min] |
|---------------------|---------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------|
| 11                  | 0,045448            | 454,48      | 0,00325                                                            |
| 22                  | 0,047527            | 475,27      | 0,00412                                                            |

Uma vez que as partículas secas possuíam  $\rho_s = 1,443 \text{ g/cm}^3$  e  $d_p = 80 \mu\text{m}$ , elas pertencem ao grupo A da classificação de Geldart, i.e., pós com diâmetro pequeno e/ou baixa densidade e ligeiramente coesivos. Como o material estudado é ligeiramente coesivo, foi preciso usar a agitação mecânica por um certo período de tempo, enquanto o material apresentava um conteúdo de umidade ainda alto, e depois o leito fluidizava sem a necessidade da agitação.

## Conclusão

A partir do estudo da influência da agitação na fluidodinâmica do leito fluidizado, constatou-se que o leito entrou em fluidização sem passar pelo pico de queda de pressão máxima e que a agitação foi importante, por permitir que partículas com características coesivas fossem fluidizadas com sucesso. O uso da agitação mecânica evitou a formação dos caminhos preferenciais do gás,

diminuindo a resistência das partículas, originando uma fluidização de qualidade e a secagem uniforme do material, sendo o mesmo resultado encontrado no trabalho de Brekken *et al.* (1970).

As curvas de secagem ( $X/X_0$  versus  $t$ ) mostraram a predominância do período de taxa de secagem constante, indicando que o material possui grande parte do seu conteúdo de umidade na superfície e que, após 40min (para um conteúdo de umidade inicial de 11% em base seca) e 55min (para um conteúdo de umidade inicial de 22% em base seca), ele está praticamente isento de umidade nas condições utilizadas no processo.

Dessa forma, o leito fluidizado agitado pode ser usado para a secagem de materiais com características coesivas, quando úmido, sem a ocorrência de caminhos preferenciais do gás e sem formação de aglomerados de partículas.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

## Nomenclatura

|                       |                                                                                           |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| $d_p$                 | diâmetro médio da partícula ( $\mu\text{m}$ )                                             |
| $(-dX/dt)$            | taxa de secagem [( $g_{\text{água}}/g_{\text{material seco}}$ )/min]                      |
| $H$                   | altura de leito fixo (cm)                                                                 |
| $\Delta P$            | queda de pressão (cm de $\text{H}_2\text{O}$ )                                            |
| $Q$                   | vazão do gás de secagem (kg/min)                                                          |
| $t_{\text{agitação}}$ | tempo de agitação (min)                                                                   |
| $T_{\text{gás}}$      | Temperatura do gás de secagem ( $^{\circ}\text{C}$ )                                      |
| $v_{\text{gás}}$      | velocidade do gás de secagem (m/s)                                                        |
| $X$                   | conteúdo de umidade do sólido ( $g_{\text{água}} / g_{\text{material seco}}$ , base seca) |
| $X_0$                 | conteúdo de umidade inicial do sólido (% base seca)                                       |
| $X_f$                 | conteúdo de umidade final do sólido (ppm ou %, base seca)                                 |
| $\rho_s$              | massa específica do sólido ( $\text{g/cm}^3$ )                                            |

## Referências

- AMBROSIO, M.C.B. *Secagem de Particulado Coesivo em Secador de Leito FLuidizado Agitado*. 1999. Dissertação (Mestrado)-Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.
- BREKKEN, R. A. *et al.* Fluidization of flour in a stirred aerated bed: part I. General fluidization characteristics. *Chem. Eng. Prog. Symp. Se.*, New York, v. 66, n. 101, p. 81-90, 1970.
- MUJUMDAR, A.S.; MENON, A.S. Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. In:

MUJUMDAR, A.S.(Ed.) *Handbook of Industrial Drying*. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1995. v. 1, p. 1-2.

REAY, D. Fluid bed drying. In: GELDART, D. *Gas Fluidization Technology*. New York: John Wiley & Sons, 1986, cap. 10, p. 259, 267-271.

REED, T.M.; FENSKE, R. Effects of agitation on gas fluidization of solids. *Engineering, Design. and Process Development* v.47, n.2, p. 275-282, 1955.

*Received on June 24, 2004.*

*Accepted on September 23, 2004.*