



UNIDADE MULTIFUNCIONAL PARA O ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE MASSA EM SECADORES

Jefferson R. Mesquita – e-mail: jeffribas@aol.com

Luíson S. Silva – e-mail: scoppel@bol.com.br

Maurício C. Mancini^(*) – e-mail: mancini@ufrj.br

Luís A. Calçada – e-mail: calçada@ufrj.br

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – Instituto de Tecnologia
Departamento de Engenharia Química – Laboratório de Sistemas Particulados
Caixa Postal 74578 - Seropédica - RJ - 23851-970

(*) Autor para quem as correspondências devem ser enviadas

Resumo: *Uma unidade de secagem multifuncional foi montada no Laboratório de Sistemas Particulados do Departamento de Engenharia Química do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. O sistema viabiliza o estudo da transferência de massa em secadores de leito fixo e camada delgada e secadores de leito fluidizado. O equipamento consiste de uma câmara de condicionamento, para regulagem da umidade absoluta do gás de secagem, um soprador centrífugo de 1 cv, dois sistemas independentes de aquecimento, uma célula de secagem em leito fixo de 9,0 cm de diâmetro e 3,5 cm de altura e um sistema de secagem em leito fluidizado de 5,0 cm de diâmetro e 20 cm de altura. O equipamento pode ser utilizado para a determinação de dados de umidade de equilíbrio ou das curvas de secagem de partículas orgânicas ou inorgânicas. Como o custo de montagem da unidade não é superior a US\$ 1.500,00, a mesma pode ser utilizada em aulas práticas de fenômenos de transporte, objetivando a determinação do coeficiente de transferência de massa, das isotermas de secagem do material e das propriedades fluidodinâmicas dos sistemas particulados considerados numa ampla faixa de condições de operação.*

Palavras-chave: *Leito fixo, Leito fluidizado, Cinética de secagem, Isoterma de equilíbrio*

1. INTRODUÇÃO

A transferência de massa em secadores vem sendo estudada nos trabalhos de pesquisa desenvolvidos no LSP/DEQ/IT/UFRRJ nos últimos dez anos, uma vez que o conhecimento dos fenômenos de troca envolvidos na secagem é fundamental para o projeto, avaliação e otimização dos equipamentos de secagem.

No trabalho de MANCINI (1996) foi apresentado um sistema de secagem em leito fixo e camada delgada que possibilitou a realização de uma série de estudos relativos à transferência de massa. O equipamento viabilizou a realização de experimentos de secagem em condições de operação estáveis por períodos superiores a seis horas. Nos últimos quatro anos, este equipamento foi utilizado pelos alunos da disciplina de Fenômenos de Transporte Experimental do DEQ/IT/UFRRJ, em seus estudos sobre transferência de massa.

No trabalho de MARTINS *et al.* (2000) uma câmara de umidificação do gás de secagem foi acoplada ao sistema desenvolvido por MANCINI (1996), possibilitando o ajuste das con-

dições de umidade do gás nos experimentos de secagem e a determinação da umidade de equilíbrio de diversos materiais.

No presente trabalho, foram feitas alterações no equipamento existente, de modo a viabilizar o desenvolvimento de estudos em leitos fixo e fluidizado, relativos à fluidodinâmica de leitos fluidizados, à determinação de isotermas de equilíbrio e à transferência de massa e calor.

Para avaliar as possibilidades didáticas do sistema desenvolvido neste trabalho, foram realizados alguns estudos de casos, envolvendo a determinação de isotermas de equilíbrio de alumina e feijão carioca e, também, o estudo da transferência de massa em partículas de alumina em leitos fixo e fluidizado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 O equipamento de secagem original

O equipamento que deu origem à unidade multifuncional apresentada neste trabalho foi montado no laboratório de Sistemas Particulados do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (LSP/DEQ/IT/UFRRJ) está esquematizado na Figura 1 e é detalhadamente descrito no trabalho de MARTINS *et al.* (2000).

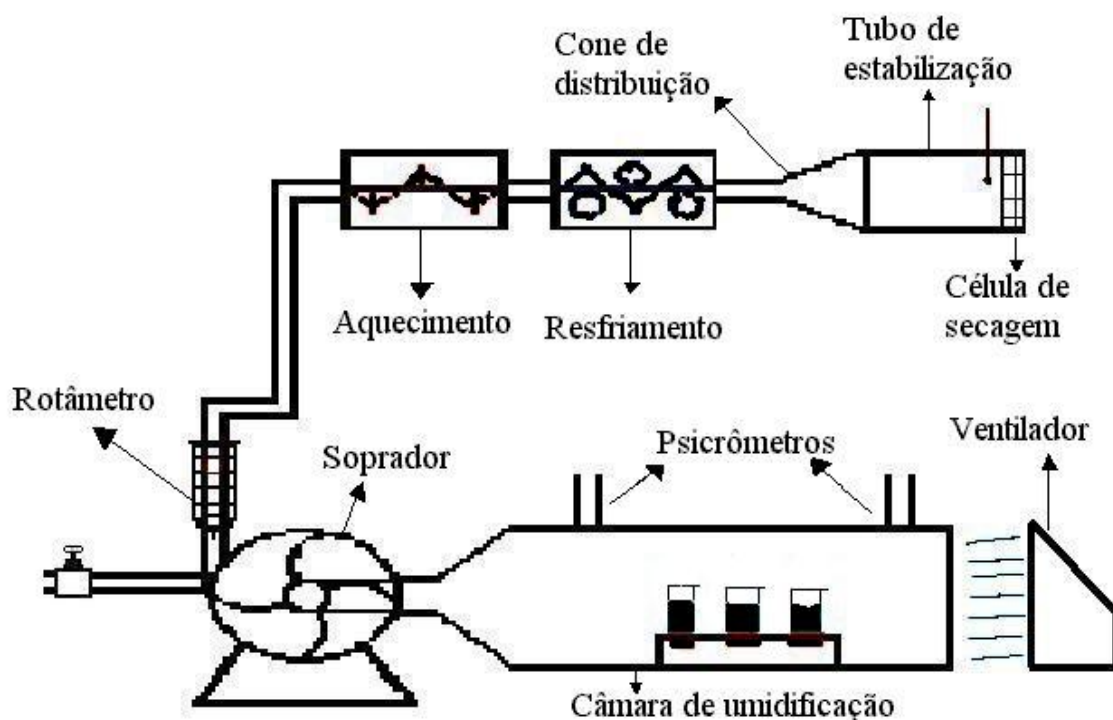


Figura 1 - Unidade de secagem desenvolvida por Martins *et al.* (2000).

O sistema de secagem foi dividido em 3 seções: câmara de umidificação, sistema de injeção de gás de secagem, secador de leito fixo e camada delgada.

A câmara de umidificação foi feita de madeira do tipo “madeirite” de 1,5 cm de espessura, apresentando as seguintes dimensões: 223 x 56 x 59 cm. O método adotado para umidifi-

cação do gás é a injeção direta de vapor d'água gerado dentro da câmara com o auxílio de placas de aquecimento e Bechers com água.

Esta unidade tinha o inconveniente de exigir sucessivas recargas dos Bechers, ocasionando instabilidade no sistema de umidificação e provocando alterações das condições do ar.

2.2 Unidade de secagem modificada

O atual sistema de secagem está esquematizado na Figura 2 e pode ser dividido em 5 seções: câmara de umidificação, sistema de injeção de gás de secagem, secador de leito fixo e camada delgada e dois secadores de leito fluidizado.

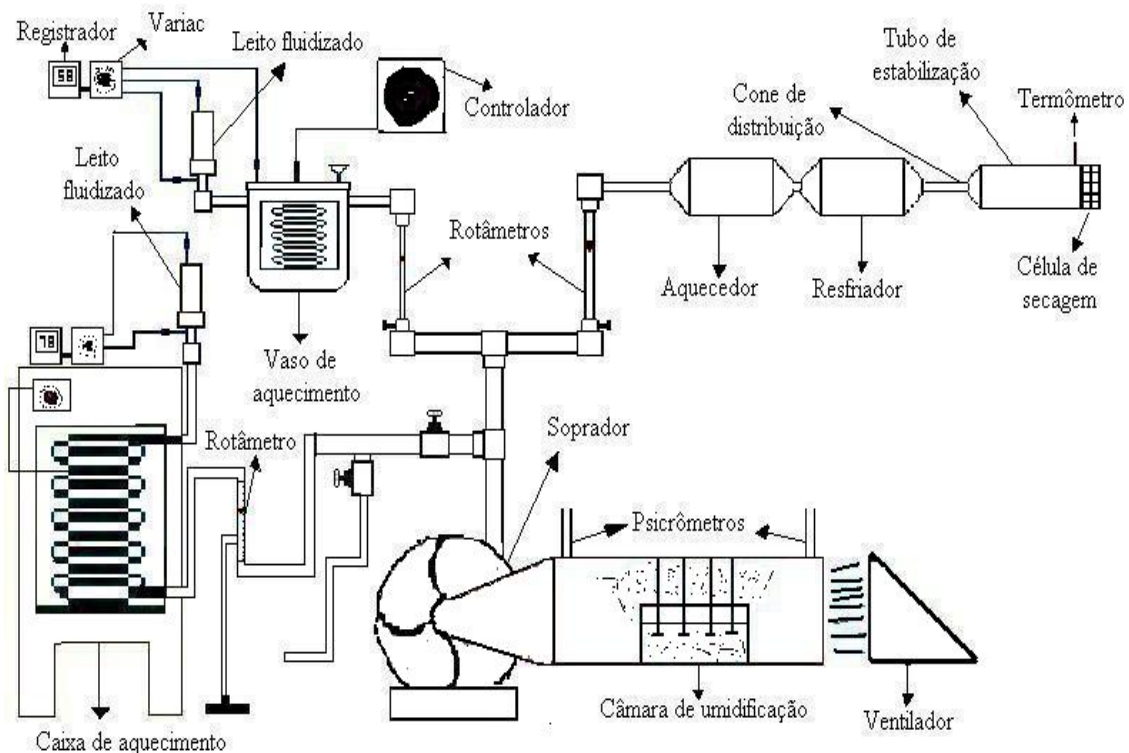


Figura 2: Unidade de secagem desenvolvida neste trabalho.

A seção de secagem em leito fluidizado é constituída por dois sistemas de condicionamento de gás independentes do utilizado em leito fixo, dois distribuidores de gás de partículas de areia, consolidadas com adesivo, e as colunas de secagem de PVC, com 5,0 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

O aquecimento do gás de secagem em uma das unidades de leito fluidizado é promovido pela passagem do gás por uma serpentina submersa num reservatório contendo água aquecida por um ebulidor. Esta seção pode ser utilizada em experimentos que requeiram temperaturas até 100 °C.

Para o segundo sistema em leito fluidizado, foi montada uma caixa de aquecimento com, uma serpentina em seu interior, envolvida por uma resistência de 3000 W, controlada por um termostato. A resistência está isolada por material refratário moído e, nesta seção, os experimentos podem ser realizados em temperaturas de 40 a 300 °C.



Na câmara de umidificação, o sistema de Bechers, anteriormente utilizado, foi substituído por um reservatório de 40 litros, conectado, pelo sistema de vasos comunicantes, a um outro reservatório de 20 litros, situado fora da câmara, o que possibilitou a reposição contínua da água evaporada, sem abrir a câmara e causar variações nas condições do gás. A água do reservatório interno foi vaporizada utilizando-se um conjunto de ebulidores submersos.

Na Tabela 1 são apresentados valores médios do aumento de umidade absoluta do gás utilizando o sistema de ebulidores.

Tabela 1 – Resultados médios para a umidificação do gás de secagem.

Nº de ebulidores	$Y_{g\text{médio}}$ (entrada)	$Y_{g\text{médio}}$ (saída)	ΔY_g (%)
0	0,0148	0,0148	0,0
1	0,0122	0,0148	21,31
2	0,0159	0,0242	52,20
3	0,0139	0,0236	69,78
4	0,0117	0,0250	113,67

Y_g – Umidade do gás em base seca

Instrumentação

As medidas de temperatura no secador de leito fixo foram feitas por meio de termômetros de mercúrio (-10 °C a 150 °C, com precisão de 0,5 °C), com tomadas de temperatura junto às telas de entrada e saída da célula de secagem. Nos leitos fluidizados foram utilizados termopares de Fe-Co, com precisão de 0,5 °C, com tomadas de temperatura no vaso e na caixa de aquecimento, nas entradas dos secadores, nas bases e nos topos dos leitos de partículas.

As medidas de umidade absoluta do gás de secagem na entrada e na saída da câmara de umidificação foram feitas com o auxílio de psicrômetros com termômetros de bulbo seco e bulbo úmido.

As medidas de vazão foram feitas com o auxílio de rotâmetros adequados às faixas de vazão de gás considerada em cada seção de secagem.

Custo de montagem do equipamento

O custo de montagem deste equipamento em um laboratório didático não ultrapassa o montante de US\$ 1.500,00. Na Tabela 2 é apresentado um orçamento aproximado do sistema de secagem.

Tabela 2 - Orçamento aproximado da montagem da unidade de secagem.

Componente	Custo (US\$)
Soprador de 1 cv	750,00
Rotâmetros	300,00
Sistemas de aquecimento	200,00
Montagem mecânica	250,00
TOTAL	1.500,00



Operação do Equipamento

A operação do equipamento envolve três etapas: umidificação do ar, estabilização do sistema térmico e a secagem, sendo que as três seções de secagem podem operar de forma independente e simultânea.

A etapa de umidificação do ar consiste na injeção contínua de vapor d'água no interior da câmara de secagem e este sistema leva cerca de 90 minutos para estabilizar.

Após a estabilização do sistema de umidificação, o sistema de condicionamento do gás é ligado e são feitos os ajustes na vazão e na temperatura de secagem relativa a cada um dos experimentos realizados.

Após a estabilização dos sistemas de umidificação e condicionamento do gás, as etapas de secagem podem ser iniciadas, acondicionando-se o material particulado estudado na célula de secagem em leito fixo ou no corpo dos secadores de leito fluidizado.

A determinação da quantidade de água eliminada foi feita pela pesagem da célula, ou do corpo do secador de leito fluidizado, em uma balança digital em intervalos pré-definidos, obtendo-se a massa de água evaporada por diferença.

2.3 Estudo de casos

Para avaliar a viabilidade de utilização da unidade experimental construída neste trabalho, foi feito um estudo de casos, envolvendo a determinação de um conjunto de valores de umidade de equilíbrio de alumina e feijão carioca, assim como das curvas de secagem de alumina em leito fixo e leito fluidizado.

As partículas utilizadas foram reumidificadas artificialmente, por meio de borrifamento de água sobre o material, e submetidas a periódicas homogeneizações ao longo das 24 horas que antecederam a realização dos experimentos.

A determinação da umidade do material foi feita pelo método clássico de conduzir uma amostra à estufa a 105 °C até peso constante.

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os valores do diâmetro médio de partícula (D_p), da densidade do sólido (ρ), da esfericidade das partículas de feijão e alumina utilizadas (ϕ) e da porosidade do leito fixo (ϵ) ou da porosidade de mínima fluidização (ϵ_{mf}), bem como os métodos de determinação, conforme descritos em Calçada (1998), Wildhagen *et al.*, (1999 e 2000) e SLONGO *et al.* (2002).

Tabela 3 - Características físicas do feijão.

Variável	Método Utilizado
$D_p = 0,78 \text{ cm}$	Picnometria
$\rho = 1,19\text{g/cm}^3$	Picnometria
$\phi = 0,80$	Permeametria
$\epsilon = 0,38$	Volumetria

Tabela 4 - Características físicas da alumina.

Experimentos em leito fluidizado		Experimentos em leito fixo	
Variável	Método Utilizado	Variável	Método Utilizado
$D_p = 162,2 \mu\text{m}$	Difração de laser em Malvern® Mastersizer	$D_p = 0,430 \text{ cm}$	Picnometria
$\rho = 2174 \text{ kg/m}^3$	Picnometria	$\rho = 1690 \text{ kg/m}^3$	Picnometria
$\phi = 0,90$	Permeametria	$\phi = 0,90$	Permeametria
$\varepsilon_{mf} = 0,60$	Volumetria	$\varepsilon = 0,34$	Volumetria

Foram realizados 36 experimentos de secagem de alumina em leito fixo e camada delgada, 60 experimentos de secagem de alumina em leito fluidizado e 16 experimentos de secagem de feijão carioca em leito fixo e camada delgada. Na Tabela 5 são apresentadas as faixas de temperatura do gás (T_g), umidade relativa do gás (UR), umidade absoluta do gás (Y_g), em base seca, e vazão volumétrica do gás de secagem (Q_g) utilizadas nos experimentos realizados no equipamento montado neste trabalho.

Nos experimentos conduzidos em leito fluidizado, verificou-se que a velocidade de mínima fluidização do leito (V_{gmf}) atingiu valores em torno de 0,018 m/s, equivalente a um fluxo mássico de gás (G_g) igual a 0,020 kg/m²s (WILDHAGEN *et al.*, 2000).

Tabela 5 - Faixas de condições operacionais para a secagem da alumina e do feijão.

Variável	Leito Fixo Alumina	Leito Fixo Feijão	Leito Fluidizado Alumina
$T_g(^{\circ}\text{C})$	40,1 a 60,7	40,0 a 72,0	49,7 a 70,7
UR(%)	10,30 a 51,00	5,7 a 57,7	5,85 a 33,35
Y_g	0,0112 a 0,0267	0,0116 a 0,0290	0,0102 a 0,0267
$Q_g(\text{L/h})$	10000 a 30000	20000	200 a 240

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificou-se que a unidade experimental montada neste trabalho foi um instrumento viável para o estudo da transferência de massa e a determinação de dados de equilíbrio termodinâmico relacionados à secagem.

O equipamento é de fácil operação, possibilitando a sua utilização por alunos de graduação ou por pesquisadores iniciantes, as condições experimentais são mantidas estáveis e o ajuste das mesmas é feito por mecanismos simples, que não requerem elevados investimentos para montagem da unidade.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para a discriminação de modelos de isoterms de equilíbrio do feijão carioca e dos dois tipos de alumina consideradas neste trabalho, assim como aqueles referentes à determinação dos parâmetros dos coeficientes de transferência de massa na secagem de alumina em leito fixo e camada delgada e em leito fluidizado.

3.1 Discriminação de modelos de isothermas de equilíbrio

Com base nos resultados dos experimentos de secagem de alumina e feijão carioca, foi possível avaliar experimentalmente a umidade de equilíbrio destes materiais, o que possibilitou a discriminação de modelos de isothermas de equilíbrio, em que os modelos mais comumente citados na literatura foram utilizados para descrever o comportamento das variações da umidade de equilíbrio com as variáveis operacionais.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos para aquelas correlações que apresentaram os melhores ajustes entre modelo e resultados experimentais. Pela análise dos resultados apresentados, foi possível constatar que a isoterma de Roa é a que melhor descreve o comportamento da umidade de equilíbrio, uma vez que foi a que apresentou os menores desvios relativos médio e máximo, os maiores valores para o coeficiente de correlação e para a estatística F.

Não há informações na literatura sobre isothermas para a variedade feijão carioca e as isothermas de alumina, usualmente empregadas, estimam os valores da umidade de equilíbrio com erros maiores que 25 %. Assim, na Tabela 7 são apresentados os valores dos parâmetros da isoterma de Roa para feijão carioca e alumina, como mais uma contribuição deste trabalho.

Tabela 6: Resultados das correlações de isothermas de alumina e feijão.

Secagem de alumina em leito fixo				
Isothermas	R	Desvio médio(%)	Desvio máximo(%)	Teste F
Chen-Cleyton	0,906	11,19	30,0	64,81
Harkins-Jura	0,908	10,76	31,0	66,93
Smith	0,901	11,12	30,0	62,27
Roa	0,951	8,20	25,0	122,10
Secagem de alumina em leito fluidizado				
Isothermas	R	Desvio médio(%)	Desvio máximo(%)	Teste F
Chen-Cleyton	0,979	8,62	25,0	163,50
Chung-Pfost	0,977	8,35	25,0	154,52
Rodrigues Arias	0,982	7,16	21,0	195,18
Roa	0,988	6,02	19,0	280,77
Secagem de Feijão em Leito fixo				
Isothermas	R	Desvio médio (%)	Desvio máximo (%)	Teste F
Chen-Cleyton	0,947	12,02	32,40	79,00
Chung-Pfost	0,937	13,40	49,80	66,86
Halsey Mod.	0,943	14,17	57,87	73,88
Roa	0,974	9,46	26,12	159,29

Tabela 7 – Parâmetros da isoterma de Roa para feijão carioca e alumina.

Material	p1	p2	p3	q1	q2	q3	q4	q5	q6
Feijão Carioca $D_p = 7,80.10^{-3}$ m	1,0150	-3,7485	3,4480	-0,0257	0,0572	-0,8211	-1,1660	12,956	-33,482
Alumina $D_p = 4,30.10^{-3}$ m	0,0576	-3,5502	5,8009	0,0780	-1,7922	11,321	-26,693	20,589	4,4806
Alumina $D_p = 1,62.10^{-4}$ m	3,9606	-23,104	33,775	-0,0072	-0,8896	8,7620	-33,953	51,900	-2,1141

Isoterma de Roa

$$Y_{se} = (p1.UR + p2.UR^2 + p3.UR^3) \exp[(q1 + q2.UR + q3.UR^2 + q4.UR^3 + q5.UR^4).(T_g + q6)]$$

3.2 Estudo da transferência de massa na secagem de alumina

Como uma comprovação da versatilidade do equipamento desenvolvido nesta pesquisa, foi possível realizar o estudo da transferência de massa na secagem de partículas de alumina em leito fixo e leito fluidizado.

No caso da secagem de alumina, os mesmos experimentos utilizados na determinação do valor da umidade de equilíbrio (Y_{se}) puderam ser empregados nos estudos cinéticos, uma vez que, em cerca de 360 minutos, o sólido atinge a umidade de equilíbrio.

Nas equações (1) a (4) são detalhados os modelos utilizados neste estudo de transferência de massa, nas quais Y_{so} é a umidade inicial do sólido, Y_{se} é a umidade de equilíbrio do sólido, $Y_s(t)$ é a umidade do sólido no instante t , t é o tempo de secagem, V_{sp} é o volume do sistema particulado, M_{ss} é a massa de sólido seco e k , α e β são parâmetros dos modelos.

Modelo exponencial:

$$Y_s(t) = Y_{se} + (Y_{so} - Y_{se}) \exp(-kt) \quad (1)$$

Modelo de Coeficientes Globais:

$$Y_s(t) = Y_{se} + \frac{\left(\frac{\beta}{\alpha} - Y_{se}\right)}{\left[1 + (\omega - 1) \exp(-\omega\tau)\right]} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{\alpha V_{sp} (Y_{so} - Y_{se})}{M_{ss}} t \quad (3)$$

$$\omega = \frac{\left(\frac{\beta}{\alpha} - Y_{se}\right)}{\left(Y_{so} - Y_{se}\right)} \quad (4)$$

Com base nas curvas de secagem obtidas e utilizando um programa para estimativa de parâmetros desenvolvido no LSP/DEQ/UFRRJ, foram determinados os parâmetros k , do modelo exponencial, e α e β , do modelo de coeficientes globais, cujo equacionamento é detalhado no trabalho de MANCINI (1996).

Nas Figuras 3.a e 3.b são apresentadas as curvas de secagem experimentais e simuladas relativas a dois experimentos característicos de secagem de alumina em leito fixo e camada delgada. Os resultados obtidos para os outros experimentos foram semelhantes.

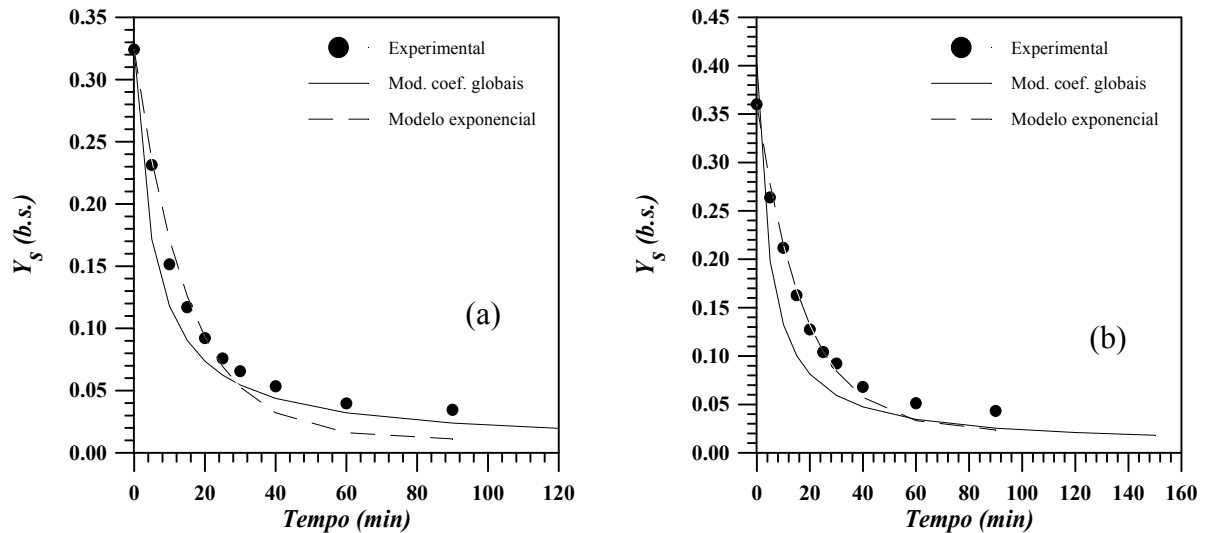


Figura 3 - Comparação entre resultados simulados e experimentais para a secagem de partículas de alumina em leito fixo (a) experimento 6: $T_g = 60,3^\circ\text{C}$, $UR = 10,30\%$ e $Q_g = 20000$ l/h, (b) experimento 21: $T_g = 50,0^\circ\text{C}$, $UR = 22,00\%$ e $Q_g = 10000$ l/h.

Pela análise das Figuras 3.a e 3.b, pode-se constatar que, para valores de umidade do sólido de até 0,05, em base seca, as curvas de secagem experimentais são melhor descritas pelo modelo exponencial. Para teores de umidade inferiores a 0,05, em base seca, o modelo de coeficientes globais é melhor que o modelo exponencial ou equivalente a este.

Na Figura 4 são apresentados os resultados da simulação utilizando o modelo exponencial para descrever a secagem de alumina em leito fluidizado. Apenas o modelo exponencial foi utilizado na simulação da secagem em leito fluidizado, uma vez que os resultados obtidos para o modelo de coeficientes globais não foram satisfatórios, indicando que este modelo não descreve adequadamente a secagem de partículas de alumina nas condições experimentais empregadas.

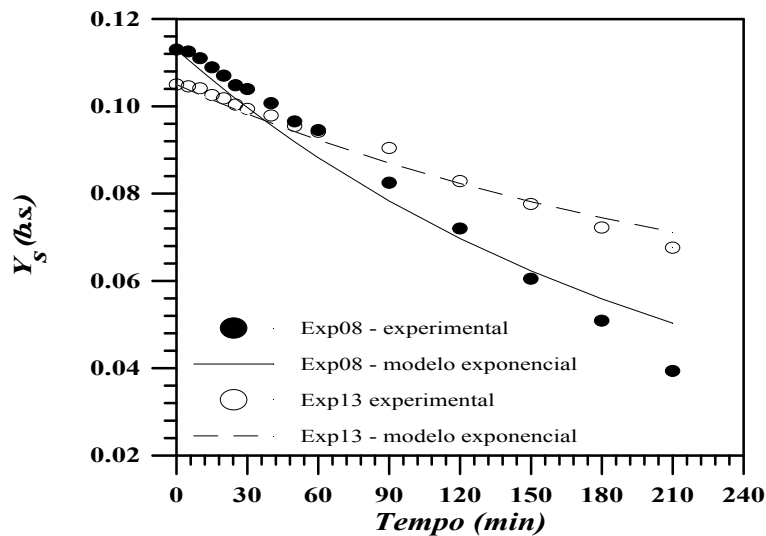


Figura 4 - Comparação entre resultados simulados e experimentais em leito fluidizado.
 (experimento 8 - $T_g = 60,4^\circ\text{C}$, UR = 17,34% e $Q_g = 220$ l/h)
 (experimento 13 - $T_g = 50,8^\circ\text{C}$, UR = 16,52% e $Q_g = 240$ l/h)

Assim como foi observado na secagem em leito fixo, a secagem de alumina em leito fluidizado é satisfatoriamente descrita pelo modelo exponencial, até valores de umidade do sólido em torno de 0,05, em base seca.

4. CONCLUSÕES

A unidade experimental desenvolvida neste trabalho mostrou-se viável para o estudo da cinética de secagem e das condições de equilíbrio de materiais particulados de origem orgânica e inorgânica. O equipamento é de fácil operação, adequado para utilização em aulas práticas de graduação e pós-graduação, e os experimentos são realizados de maneira simplificada, rápida, com um custo baixo. Além disso, o sistema mantém-se estável por todo período de realização das corridas.

O custo de montagem do sistema completo não ultrapassa o montante de US\$ 1.500,00, estando ao alcance da maioria das instituições de ensino, que, em muitos casos, já dispõem dos equipamentos necessários à construção da unidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFRRJ e a FAPERJ pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CALÇADA L.A. **Secagem de materiais Granulares Porosos**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- MANCINI M.C. **Transferência de Massa em Secadores de Grãos**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- MARTINS, M.G; OLIVEIRA, D.D.; CALÇADA, L.A. e MANCINI, M.C. Adaptação de um equipamento de secagem em camada delgada para determinação de isothermas de equilíbrio.



In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 1999, Campos do Jordão. **Anais**. São Paulo: USP, 2000. p. 599-606.

SLONGO, A.P.; SILVA, L.S.; MELO FILHO, E.H.A. e MANCINI, M.C. Estimação de parâmetros e simulação computacional da secagem feijão carioca em camada delgada. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2001, Maringá. **Anais**. Maringá: UEM, 2002. Anais em CD-ROM.

WILDHAGEN, G. R. S.; CALÇADA, L.A.; MASSARANI, G. Estimação de parâmetros na secagem em leito fluidizado. In: XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 1998, Teresópolis. **Anais**. Seropédica: UFRJ, 1999. V. II, p. 393-398.

WILDHAGEN, G. R. S.; CALÇADA, L.A.; MASSARANI, G. Modelagem da secagem em leito fluidizado: modelo a três fases. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 1999, Campos do Jordão. **Anais**. São Paulo: USP, 2000. p.499-506.

A MULTIFUNCTIONAL EXPERIMENTAL APPARATUS APPLIED TO MASS TRANSFER STUDIES IN DRYERS

Abstract: *A multifunctional drying apparatus was built in the Particulate Systems Laboratory at the Chemical Engineering Department of the Technological Institute of Federal Rural University of Rio de Janeiro. The experimental unit is available for mass transfer studies in fixed bed thin layer dryers and also in fluidized bed dryers. The equipment consists of a humidifier chamber, used to set drying air absolute humidity, a 1.0 HP blower, two independent heaters, a fixed bed drying cell of 3.5 cm height and 9.0 cm diameter and a fluidized bed drying cell of 20.0 cm height and 5.0 cm diameter. The unit can be used to perform experiments to evaluate equilibrium moisture content data and the drying curves of organic or inorganic particles. As the equipment's assemblage cost do not exceed US\$ 1,500.00, it can be used in transport phenomena experimental classes, taking aim at the determination of the mass transfer coefficients, the drying isotherms and the particulate system's fluid dynamics properties, in a large range of experimental conditions.*

Key-words: *Fixed bed, Fluidized bed, Drying kinetics, Equilibrium isotherms*