

SECAGEM DE PARTICULA POROSA EM LEITO VIBRO-FLUIDIZADO

H. PERAZZINI, F. B. FREIRE e J. T. FREIRE

Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química
E-mail para contato: freire@ufscar.br

RESUMO – O presente trabalho é uma continuação do estudo apresentado no Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (ENEMP 2013) que visou a secagem de partículas de alumina em leito vibro-fluidizado a partir de uma abordagem teórica fundamentada na formulação pseudo-homogênea. Resultados experimentais de secagem provenientes da literatura levaram à estimação de parâmetros de transferência de massa necessários para a descrição dos fenômenos envolvidos na secagem. As equações foram resolvidas analiticamente para diferentes condições de contorno e verificada a que melhor representa o fenômeno de secagem. A comparação entre dados preditos e observados mostrou que a consideração de que a umidade é também transferida por convecção foi mais satisfatória.

1. INTRODUÇÃO

A secagem de materiais granulares porosos é ainda um processo bastante estudado, não somente devido às suas aplicações tecnológicas, mas também por ser um problema cujo entendimento é bastante complexo devido à presença dos fenômenos de transferência de calor, momento e massa. Em materiais de elevada área superficial e porosidade, como é o caso mais comum dos catalisadores, sua secagem é controlada tanto por mecanismos convectivos quanto pelos difusivos. No estágio do processo no qual este é controlado tipicamente pela difusão mássica nos poros (líquido e vapor), a umidade é lentamente transferida para a fase gasosa. Assim, secadores que favorecem uma boa homogeneização das partículas e elevadas taxas de transferência de calor e massa são de interesse prático para a secagem deste tipo de material, como o secador de leito vibro-fluidizado. Os secadores de leito vibro-fluidizado possuem diversas vantagens em processos de secagem, tais como a redução na velocidade de mínima fluidização e controle do tempo de residência das partículas no interior do leito (GUPTA e MUJUMDAR, 1980). Diante de suas características vibracionais, além de proporcionar a secagem de material particulado, o secador de leito vibro-fluidizado permite a fluidização de materiais de consistência pastosa, adesiva e coesiva.

Meili, Daleffe e Freire (2007) estudaram experimentalmente a influência de parâmetros vibracionais na cinética de secagem de partículas de alumina em um leito vibro-fluidizado. Uma das principais conclusões obtidas pelos autores foi que a cinética de secagem da alumina mostrou-se dependente das diferentes combinações entre a amplitude e a frequência de vibração, não conferindo, como resultado, características universais ao adimensional de vibração. Esta

variável, a qual era anteriormente e tradicionalmente tratada com características universais, também foi amplamente questionada em estudos referentes à secagem de pastas e suspensões (DALEFFE, FERREIRA E FREIRE, 2007). Uma vez que as condições vibracionais exercem influência na secagem, torna-se importante, principalmente, a investigação do efeito destes parâmetros e das demais condições operacionais nos mecanismos de transporte. Tal análise é de particular interesse quando se desejam obter informações importantes para o projeto, operação e controle do secador, análise energética do processo e qualidade do produto final. Perazzini, Freire e Freire

Dando continuidade ao estudo desenvolvido por Meili, Daleffe e Freire (2007) e ao trabalho apresentado no Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (ENEMP 2013) (PERAZZINI, FREIRE e FREIRE, 2013), o presente trabalho visa investigar teoricamente a secagem de alumina com base no conceito da difusividade efetiva de umidade. Preliminarmente, a difusão foi estimada a partir de uma equação macroscópica de balanço de massa considerando a hipótese na qual a resistência externa à transferência de umidade é desprezível. Nessa abordagem, a difusividade efetiva foi correlacionada com a temperatura e velocidade do ar de secagem, amplitude e frequência de vibração. Em seguida, a equação de balanço foi resolvida para a situação na qual o fenômeno convectivo de transferência de massa se faz presente na secagem, usando-se outras duas diferentes condições de contorno. Como resultado, tem-se a simulação dos dados experimentais de secagem para três situações diferentes. A comparação entre dados preditos e observados, considerando as três diferentes situações, é apresentada e discutida, a fim de se obter uma melhor descrição do processo de secagem de partículas de alumina em leito vibro-fluidizado.

2. MODELO DIFUSIVO

Com base na formulação pseudo-homogênea, a transferência de massa em sistemas particulados pode ser tratada a partir do modelo difusivo. Considerando geometria esférica, assumindo constantes as propriedades do sólido, a difusividade efetiva de umidade global (Freire et al., 2014), tem-se que:

$$\frac{\partial X(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \cdot D_{\text{eff},G} \cdot \frac{\partial X(r,t)}{\partial r} \right] \quad (1)$$

A Equação 1 está sujeita à seguinte condição inicial (para $t > 0$ e $0 \leq r \leq R$):

$$\text{C.I.: } X(r,0) = X_0 \quad (2)$$

A condição de contorno tradicionalmente empregada na Equação 1 é aquela na qual o conteúdo de umidade no interior da partícula é finito, ou seja (para $t > 0$ e $r = 0$):

$$\text{C.C.1: } \left. \frac{\partial X(r,t)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (3)$$

Assumindo que a superfície da partícula atinge instantaneamente o equilíbrio com a fase gasosa, tem-se (para $t > 0$ e $r = R$):

$$\text{C.C.2(a)} : X(r, t) \Big|_{r=R} = X_{\text{eq}} \quad (4)$$

Supondo desprezível o encolhimento do material, considerando a difusividade efetiva como um parâmetro constante, o conteúdo de umidade inicial uniforme e aplicando as condições inicial e de contorno (Equações 2 a 4), chega-se à solução analítica do modelo difusivo por separação de variáveis (CRANK, 1975):

$$\chi = \frac{X(r, t) - X_{\text{eq}}}{X_0 - X_{\text{eq}}} = \frac{2R}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n \cdot r} \text{sen}\left(\frac{n\pi r}{R}\right) \exp\left[-\left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 D_{\text{eff},G} t\right] \quad (5)$$

Uma vez que se obtém durante a secagem a concentração média espacial de umidade da partícula ao longo do tempo, a umidade média é então obtida por:

$$\bar{X}(t) = \bar{X} = \frac{3}{R^3} \int_0^R X(r, t) r^2 dr \quad (6)$$

Substituindo a Equação 5 na Equação 6 e realizando a integração numérica, a umidade adimensional da partícula em função do tempo é:

$$\chi = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n}\right)^2 \exp\left[-\left(\frac{n\pi}{R}\right)^2 D_{\text{eff},G} t\right] \quad (7)$$

Quando a resistência externa à transferência de massa é levada em consideração, isto é $Bi \neq \infty$, uma modificação na C.C.2(a) é feita, a qual é (para $t > 0$ e $r = R$):

$$\text{C.C.2(b)} : \frac{\partial X(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=R} = \frac{\beta \rho_g (Y_{\text{eq}} - Y_g)}{D_{\text{eff},G} \rho_s} \quad (8)$$

Com as condições inicial (C.I) e de contorno (C.C.1 e C.C.2 (b)) e realizando novamente os cálculos para a obtenção da umidade média, que corresponde à variável a qual é obtida experimentalmente, chega-se a (CREMASCO, 2008):

$$\chi = 6 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Bi^2}{\lambda_n^2 [\lambda_n^2 + Bi(Bi - 1)]} \exp\left(-\lambda_n^2 \frac{D_{\text{eff},G} t}{R^2}\right) \quad (9)$$

Com a presença da resistência externa à transferência de umidade como mecanismo incorporado na secagem (convecção mássica), o modelo difusivo (Equação 9) se torna,

essencialmente, um modelo a dois parâmetros, no qual o número de Biot mássico é conhecido pela expressão:

$$Bi = \frac{\beta R}{D_{\text{eff},G}} \quad (10)$$

As raízes que satisfazem a equação transcendental podem ser encontradas por (CREMASCO, 2008):

$$\lambda_n \text{ctg}(\lambda_n) + Bi - 1 = 0 \quad (11)$$

O coeficiente de transferência de massa (β) foi estimado a partir do número adimensional de Sherwood com base na correlação de Ranz-Marshall. Uma nova condição de contorno pode também ser empregada para obter um modelo a dois parâmetros, diferente daquela apresentada na Equação 8. Calado, Biscaia Jr. e Massarani (1987) utilizaram a condição de contorno proposta por Rudobastha (1986) na modelagem da secagem de grãos em leito de jorro (para $t > 0$ e $r = R$):

$$\text{C.C.2(c)} : X(r, t) \Big|_{r=R} = (X_0 - X_{\text{eq}}) \exp^{-\phi t} + X_{\text{eq}} \quad (12)$$

A solução analítica do modelo proposto com as condições inicial (Equação 2) e de contorno (Equação 3 e 12) e considerando a umidade média da partículas é (CALADO, BISCAIA JR. e MASSARANI, 1987):

$$\chi = \exp(-\phi t) \left\{ 1 + \frac{6\phi R^2}{D_{\text{eff},G}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 \pi^2} \cdot \left[\frac{1 - \exp\left(\phi - \frac{n^2 \pi^2 D_{\text{eff},G}}{R^2} t\right)}{\frac{\phi R^2}{D_{\text{eff},G}} - n^2 \pi^2} \right] \right\} \quad (13)$$

Com uma condição inicial e quatro diferentes condições de contorno para a resolução do modelo difusivo, tem-se como resultado, três soluções analíticas para o modelo, as quais serão analisadas quando ajustadas aos dados experimentais obtidos na seguinte faixa operacional: $40 \leq T(^{\circ}\text{C}) \leq 80$, $8,14 \leq f(\text{Hz}) \leq 18,20$, $0,003 \leq \Pi(\text{m}) \leq 0,015$, $0,8 \leq v(\text{m/s}) \leq 1,2 u_{\text{mf}}$, $u_{\text{mf}} = 1,17 (\pm 0,01)$ m/s. Os dados experimentais de secagem para todas as condições operacionais estudadas podem ser encontrados em Meili, Daleffe e Freire (2007).

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As Figuras 1, 2 e 3 trazem a comparação típica entre dados preditos e observados pelo modelo difusivo considerando a condição de contorno do tipo de equilíbrio, convectiva e a condição de contorno alternativa (Equação 13).

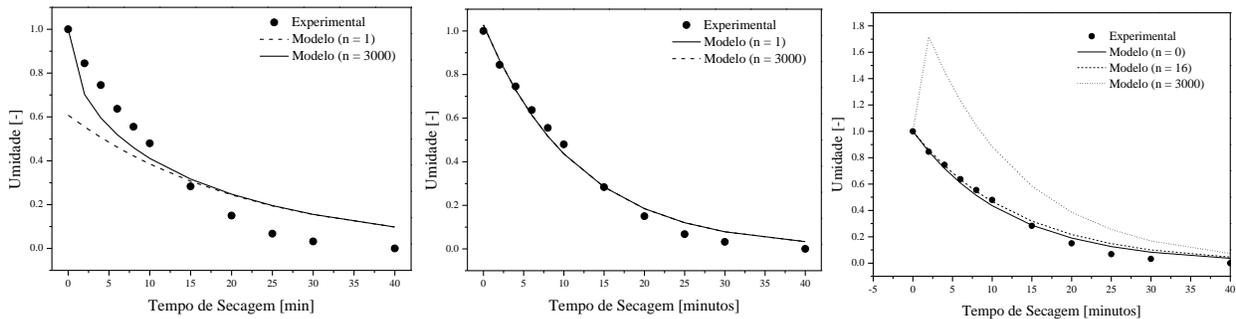


Figura 1 – Cinética de secagem observada e prevista pelo modelo difusivo com a condição de contorno CC2(a).
 Figura 2 – Cinética de secagem observada e prevista pelo modelo difusivo com a condição de contorno CC2(b).
 Figura 3 – Cinética de secagem observada e prevista pelo modelo difusivo com a condição de contorno CC2(c).

A série infinita dos modelos foi resolvida em uma rotina computacional desenvolvida em código MatLab® (R2007b, Mathworks) ao mesmo tempo em que os parâmetros do modelo difusivo foram estimados com base no critério dos mínimos quadrados. É importante ressaltar que a série foi resolvida considerando muitos termos sem o aumento de custo computacional. Os dados experimentais apresentados são para a condição de 80°C , $1,2u_{mf}$, $\Pi = 0,015$ e $f = 8,14$ Hz (MEILI, DALEFFE e FREIRE, 2007). Os resultados da comparação de dados observados de umidade em função do tempo e previstos pelo modelo difusivo considerando os 3000 primeiros termos da série e apenas o primeiro termo são apresentados na Figura 1, a partir do uso da C.C.2(a). Ao analisar os resultados apresentados na Figura 1, verifica-se que existe um desvio significativo entre os dados experimentais e aqueles previstos pela Equação 7 quando apenas um termo da série é utilizado. Utilizando apenas um termo da série, os desvios entre dados previstos e observados são elevados para geometria esférica, por exemplo: o erro médio relativo é de 39,21% em $t = 0$ e diminui ao longo do tempo, mas permanecendo elevados, com valores maiores do que 10%. Utilizando os 3000 primeiros termos, o erro é muito inferior a 1% em $t = 0$ (0,02%) e conseqüentemente, menor para os demais pontos experimentais. Para minimizar os desvios nos primeiros pontos experimentais, o lado esquerdo da Equação 7 deverá ser igual ao seu lado direito, satisfazendo a igualdade. Esta condição não é satisfeita quando $n = 1$, uma vez que a relação $(6/\pi^2)$ não é igual à unidade.

Os resultados discutidos até o presente momento referem-se à imposição de que a resistência externa à transferência de umidade não é significativa frente à resistência interna ($Bi = \infty$). Por outro lado, os resultados mostraram que a velocidade do ar é uma variável que exerce influência significativa na remoção de umidade da partícula, o que é um indício de que a resistência externa não é desprezível frente aos mecanismos de migração interna de umidade, como é o caso de quando se utiliza a condição de contorno da Equação 8. Alvarez e Legues (1986) também identificaram em seu trabalho resultados semelhantes para a secagem de uvas sem sementes. Ainda se referindo à condição de contorno utilizada, a qual impõe o equilíbrio instantâneo na superfície do sólido, está evidente que, mesmo submetendo o material particulado aos valores menos elevados de temperatura (40°C) e velocidade do ar ($0,8u_{mf}$), estas condições

não são suficientes para conferir o equilíbrio instantâneo da superfície com o ar. Esta é mais uma evidência de que o fenômeno convectivo de transferência de massa está presente na secagem de partículas porosas de alumina em leito vibro-fluidizado. Portanto, a hipótese de equilíbrio não é satisfatória para a secagem realizada em leito vibro-fluidizado nas condições estudadas, uma vez que a secagem neste secador é rápida, a qual é favorecida pela vibração imposta ao sistema. Logo, podemos afirmar que a influência da velocidade do ar no coeficiente de difusão também contribui com a baixa qualidade de ajuste fornecido pelo modelo difusivo. Resulta em investigar tal fato, se este é a principal razão para os resultados apresentados na Figura 1, ou seja, se os desvios encontrados devem-se, principalmente, à hipótese de que a concentração de vapor na superfície da partícula é equivalente à concentração de vapor quando o equilíbrio dinâmico é atingido. Dessa forma, o modelo difusivo foi resolvido considerando a outra situação proposta: a de que a resistência externa não é desprezível ($Bi \neq \infty$). Das condições de contorno que se adequam a esta nova hipótese, foi utilizada a C.C.2 (b) em substituição a C.C.2 (a). Os resultados preditos pelo modelo difusivo (Equação 15) considerando esta outra abordagem são apresentados na Figura 2. Uma rotina computacional em código MatLab foi desenvolvida para estimar os parâmetros do modelo difusivo (Bi e $D_{eff,G}$) e encontrar as raízes da equação transcendental.

Diferente dos resultados apresentados na Figura 1, verifica-se que não há distinção entre o número de termos utilizados para resolver o modelo difusivo. No que se refere à qualidade dos dados preditos, o modelo difusivo apresentou resultados simulados mais qualitativos, melhor representando a secagem em leito vibro-fluidizado. Estes resultados reforçam as suposições anteriores de que o fenômeno convectivo mássico está presente na secagem. Para comprovar este fato, o valor de β estimado foi de 0,16 m/s e o número de Biot estimado foi de 0,09, valor menor do que 0,2 que, de acordo com Strumillo e Kudra (1986), indica que o fenômeno convectivo é preponderante na secagem em leito vibro-fluidizado. É possível, dessa forma, inferir que a secagem é controlada pelo balanço de calor e massa na superfície da partícula e que o meio externo (ar de secagem e vapor d'água) influencia na difusão de umidade que ocorre no interior do sólido. No caso estudado, esta influência é expressiva, uma vez que a difusividade efetiva aumenta significativamente (ordem de grandeza próxima a 10^{-6}). Dessa forma, a resistência ao transporte de vapor na superfície da partícula é maior do que a resistência à migração interna de umidade. Como consequência, o potencial de secagem é mais dependente das condições do gás do que das próprias características do sólido. A influência da velocidade do gás pôde ser observada no número adimensional de Sherwood, 5,26 ($0,8u_{mf}$) e 7,86 ($1,2u_{mf}$), o que reforça a análise apresentada. No caso específico do secador de leito vibro-fluidizado, em que a convecção de vapor na superfície da partícula é a etapa controladora do processo, as transferências externas são as convectivas e dependem da velocidade relativa local entre o ar e as partículas, associadas aos efeitos vibracionais, segundo a tecnologia do secador utilizado. É também possível destacar que, a suposição inicialmente feita de que o número de Biot era infinito é incorreta, uma vez que a difusão é dependente da velocidade do gás. O que era anteriormente uma consideração inicial feita para aproximar o problema para a condição de camada delgada, agora é válido, frente ao baixo valor do número de Biot obtido, significando que a não-uniformidade do conteúdo de água no meio poroso pode ser negligenciado. Uma vez que isto indica uma distribuição uniforme de umidade no interior da partícula, seu diâmetro de 3,68 mm é apropriado para a aproximação do problema para camada delgada, verificando a abordagem teórica (a partir do modelo difusivo)

aqui proposta. Apesar de melhora no ajuste dos dados experimentais para este caso, observa-se que o modelo difusivo ainda superestima os dados de umidade nos instantes finais da secagem. Estudos futuros darão continuidade a esta análise, visando ainda responder esta questão. Para isso, o número de Biot será tratado como um parâmetro variável, com o intuito de melhorar os resultados preditos.

A Figura 3 apresenta os dados de umidade em função do tempo ajustados pelo modelo difusivo quando a condição de contorno (Equação 13) apresentada no trabalho de Calado, Biscaia Jr. e Massarani (1987) é utilizada. Com base neste contorno, o modelo difusivo torna-se, essencialmente, um modelo com dois parâmetros a serem determinados. Como é possível verificar nos resultados apresentados na Figura 3, o modelo difusivo torna-se fortemente dependente do número de termos da série infinita, sendo o ajuste dos dados preditos pelo modelo de pouca fundamentação física quando muitos termos da série são utilizados ($n = 3000$). Ao contrário do obtido para a situação na qual a condição de contorno do tipo equilíbrio foi empregada (Figura 1), o ajuste global é mais satisfatório quando poucos termos da série são utilizados. Mais precisamente, a partir de uma série de testes, verificou-se que o modelo sendo resolvido para $n = 16$ os dados de umidade em função do tempo são melhor simulados. Quando comparados com os resultados apresentados nas Figuras 1 e 2, o ajuste proporcionado pela Equação 13 é melhor, visto que um simples parâmetro de ajuste (ϕ) é adicionada na condição de contorno da Equação 12. No entanto, observou-se que a difusividade efetiva foi fortemente dependente do chute inicial do parâmetro. Para vários testes realizados, o valor estimado sempre foi equivalente ao seu valor inicial, implicando que a Equação 13 não é fisicamente consistente para representar os dados de secagem em leito vibro-fluidizado para as condições operacionais estudadas.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho, foi estudada a aplicação do modelo difusivo na secagem de partículas porosas em leito vibro-fluidizado. Com base nos resultados obtidos, verificou-se que o mecanismo de transferência de massa convectivo mostrou-se preponderante com relação ao mecanismo difusivo. A secagem de partículas de alumina em leito vibro-fluidizado é controlada pela transferência externa de vapor da superfície da partícula para a fase gasosa. A condição de contorno utilizada por Calado, Biscaia Jr. e Massarani (1987) proporcionou um melhor ajuste aos dados experimentais, no entanto, a difusividade efetiva mostrou-se dependente do chute inicial do parâmetro, não fornecendo estimativas fundamentalmente consistentes para o mesmo. Dessa maneira, a condição de contorno do tipo convectiva que leva em consideração o número de Biot é mais apropriada.

5. NOMENCLATURA

Bi	Número de Biot mássico	-
$D_{\text{eff,G}}$	Difusão efetiva global	m^2/s
f	Frequência de vibração	Hz
n	Número de termos da série	-

r	Coordenada radial	-
R	Raio da partícula	m
t	Tempo de secagem	min
T	Temperatura	°C
u_{mf}	Velocidade mínima fluidização	m/s
X	Umidade do sólido	kg/kg
X_0	Umidade inicial do sólido	kg/kg
X_{eq}	Umidade de equilíbrio	kg/kg
Y_{eq}	Umidade de equilíbrio do gás	kg/kg
Y_g	Umidade do gás	kg/kg
Π	Amplitude	m
β	Coefficiente de transferência de massa	m/s
χ	Umidade adimensional	-
λ_n	Autovalor	-
ρ_g	Densidade do gás	kg/m ³
ρ_s	Densidade do sólido	kg/m ³
ϕ	Parâmetro da C.C.(c)	-

6. REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, P. I; LEGUES, P.A semi-theoretical model for the drying of Thompson seedless grapes. *Drying Tech.*, v.4, p.1-17, 1986.
- CALADO, V. M.; BISCAIA Jr., E. C.; MASSARANI, G.. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 15., 1987, Uberlândia. *Anais...* Uberlândia, UFU, 1987.
- CRANK, J. *The mathematics of diffusion*. Oxford: Claredon Press, 1975.
- CREMASCO, M. A. *Fundamentos de transferência de massa*. Campinas: Unicamp, 2008.
- DALEFFE, R. V.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. Analysis of the effect of particle size distributions on the fluid dynamic behavior and segregation patterns of fluidized, vibrated and vibrofluidized beds. *Asia Pac. J. Chem. Eng.*, v. 2, p. 3-11, 2007.
- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A.S. Aerodynamics and thermal characteristics of vibrated fluid beds - a review. In: MUJUMDAR, A.S. (Eds.). *Drying 80*. New York: Hemisphere Publishing, 1980a. v.1, p.141-50.
- MEILLI, L.; DALEFFE, R. V.; FREIRE, J. T. Estudo da influência dos parâmetros vibracionais na secagem de alumina porosa em leito fluidizado e vibrofluidizado. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 33., 2007, Aracaju. *Anais...* Aracaju, UFS, 2007. p.1-10.
- PERAZZINI, H.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Difusão de umidade na secagem de partículas porosas em leito vibro-fluidizado. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 36., 2013, Maceió. *Anais...*Maceió, UFAL, 2013. (Emanálise)
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. *Drying: principles, applications and design*. Montreux: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.