

Avaliação das propriedades térmicas efetivas da soja em um secador de leito fixo

Leonardo Vasconcelos Fregolente, Érico Caliani, Onélia Aparecida Andreo dos Santos e Luiz Mario de Matos Jorge*

Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. e-mail: lmmj@deq.uem.br

RESUMO. Neste trabalho foram estimadas as propriedades térmicas efetivas em um secador de leito fixo, empacotado com grãos de soja, a partir do ajuste de um modelo pseudo-homogêneo bidimensional aos perfis experimentais de temperatura, obtidos de ensaios em um secador de leito fixo, aquecido pela parede e pelo ar alimentado, operando em condições de regime permanente a várias vazões. Os resultados indicam que tanto a condutividade efetiva radial (K_r) como o coeficiente de transferência de calor parede-leito (hw) apresentam um comportamento crescente e linear com o aumento da vazão, praticamente insensível ao teor de umidade de equilíbrio dos grãos de soja, na faixa das condições experimentais exploradas.

Palavras-chave: leito fixo, secagem de soja, propriedades térmicas efetivas.

ABSTRACT. Evaluation of soybean effective heat transfer properties in a fixed bed dryer. In this research, effective heat transfer properties were evaluated in a fixed bed dryer packed with soybeans, fitting a bidimensional pseudo-homogeneous model to the experimental temperature profiles, obtained from a fixed bed dryer, heated by the wall and by the injected air, at steady state conditions with various air flow rates. The results reveal that both thermal parameters: effective radial conductivity (K_r) and wall heat transfer coefficient (hw) may be represented as an increasing and linear function of air flow rate, practically independent of the soybeans equilibrium moisture content within the range of experimental conditions used.

Key words: fixed bed, soybeans drying, effective heat transfer properties.

Introdução

Freqüentemente os cereais são colhidos com um teor de umidade inadequado ao seu armazenamento, sendo usual diminuí-lo mediante o processo de secagem. Essa, por sua vez, representa uma operação industrial de alto custo energético e pode ser realizada de várias formas, dependendo principalmente da natureza e da quantidade de material a ser seco.

Segundo Mhimid e Bennisrallah (1997), os secadores podem ser classificados de três formas distintas: a) quanto ao modo de operação: contínuo ou descontínuo; b) quanto ao mecanismo de aquecimento do material: direto (contato direto com o gás quente) e indireto (pela parede, por radiação etc.); c) quanto aos sentidos dos fluxos dos grãos e do ar de secagem: leito fixo; fluxos cruzados; fluxos contracorrentes; fluxos concorrentes e fluxos mistos.

Dentre essas, a secagem em leito fixo pode representar uma alternativa viável em condições

específicas, podendo inclusive ser executada no próprio silo de armazenamento, mediante aquecimento e injeção de ar comprimido. Entretanto, a secagem é um processo complexo em que ocorrem, simultaneamente, a transferência de calor e de massa (Spencer, 1969), podendo proporcionar variações significativas de temperatura e de umidade no leito, conforme constatado por Calado e Biscaia Jr. (1992), Calçada *et al.* (1993) e Mhimid e Bennisrallah (1997), dessa forma, desencadear alterações na qualidade do produto.

Nesse contexto, a modelagem e simulação representam ferramentas de grande auxílio no projeto e análise de secadores de leito fixo, podendo, ainda, contribuir para o desenvolvimento de estratégias de controle mais eficientes, visando à preservação das características finais do produto seco.

Por sua vez, o sucesso da simulação de um processo de secagem em leito fixo depende da utilização de um modelo matemático adequado e do conhecimento das

propriedades referentes à transferência de calor e de massa do sistema. Essas propriedades podem sofrer influência do tipo de cereal e da sua geometria do teor de umidade e da vazão de ar dentre outros, evidenciando a necessidade de desenvolver estudos visando alcançar uma melhor compreensão do comportamento dessas propriedades na secagem em leito fixo.

A estimativa de propriedades térmicas efetivas em leito fixo tem sido extensivamente estudada nas últimas décadas, especialmente nas situações de ausência de transferência de massa e na presença de reações químicas. Entretanto, a estimativa de propriedades térmicas efetivas em secadores de leito fixo tem sido pouco explorada, especialmente quando o leito é composto por cereais.

Dentre os trabalhos que abordam a estimativa de propriedades térmicas efetivas de leitos fixos compostos por cereais, pode-se citar Da Silva e Sanchez De Alsina (1987) e Costa *et al.* (1998).

Neste contexto, foram efetuados ensaios em um secador de soja em leito fixo, aquecido de forma direta e indireta, visando estimar as propriedades térmicas efetivas radiais: h_w (coeficiente de transferência de calor parede-leito) e k_r (condutividade térmica efetiva radial) bem como avaliar a influência da vazão de ar e do teor de umidade dos grãos sobre essas propriedades.

Material e métodos

O módulo experimental utilizado neste trabalho é composto basicamente por um secador cilíndrico, por um sistema de leitura de temperaturas (SLT) e um psicrômetro digital, ilustrados na Figura 1. O ar proveniente de um compressor passa por um filtro de água e por uma válvula reguladora de pressão antes de ser admitido no dispositivo de aquecimento e encaminhado ao secador, no qual são efetuadas várias medidas de temperatura e de umidade, sendo finalmente descartado para o meio ambiente.

O secador é composto de duas seções: uma seção térmica com 40cm de comprimento, construída em aço inox e aquecida por uma camisa de vapor e uma seção de entrada de 25cm de comprimento, construída em PVC. As duas seções possuem 6cm de diâmetro e são unidas por uma flange de nylon a fim de minimizar a troca de calor entre as seções.

Sobre o leito, encontra-se posicionado um sensor anelar que mede as temperaturas em 5 posições radiais distintas: TR1 a TR5 e, logo acima, na saída do secador, foi fixado um psicrômetro digital que permite avaliar o teor de umidade média do ar que deixa o secador, conforme indicado na Figura 1.

O sensor anelar, ilustrado em detalhes na Figura 2, é composto por 4 anéis concêntricos, espaçados entre si por pequenas barras de nylon e suportado por uma haste também de nylon. Os anéis são constituídos por um fio de cobre de 2,5mm de diâmetro e cada um possui um mini termopar soldado (TR2-TR5). Além desses, há um quinto minitermpar (TR1) soldado junto a uma pequena haste de cobre fixada no centro do sensor.

A temperatura da parede da seção térmica é monitorada por 5 termopares igualmente espaçados (Tw1 a Tw9) e posicionados na parede dessa seção. As temperaturas na seção de entrada são medidas por 5 termopares fixados ao longo desta seção (C1 a C5). Entre essas duas seções o perfil radial de temperatura pode ser avaliado por 3 termopares inseridos radialmente através da flange (FL1 a FL3).

A temperatura do ar que entra no secador (T_o) é medida por um minitermpar soldado a uma pequena chapa metálica, delgada e circular, disposta transversalmente à corrente de ar, imediatamente abaixo da seção de entrada, conforme Figura 1.

Todos os termopares são do tipo K e estão ligados a um sistema de leitura de temperaturas (SLT) composto por uma chave seletora e um indicador de temperatura.

O dispositivo de aquecimento é totalmente construído em aço inox e dispõe de resistências elétricas no seu interior capazes de dissipar até 1000 Watts. A potência dissipada é controlada por meio de um regulador de voltagem (variac), associado ao dispositivo de aquecimento para assegurar a temperatura desejada na entrada do secador.

A soja utilizada nos ensaios de secagem possuía uma umidade inicial de 0,1246 b.s. e um diâmetro médio de partícula (dp_v) de 6,32mm. A umidade inicial da soja era determinada pesando-se uma amostra antes e depois de deixá-la em uma estufa a 105°C por 24 horas ou peso constante.

O diâmetro médio dos grãos de soja foi determinado a partir da Equação 1, pela avaliação do volume de água deslocado (ΔV) em uma proveta graduada, logo após a adição de uma amostra de soja com um número conhecido de partículas (n).

$$dp_v = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot \Delta V}{n \cdot \pi}} \quad (1)$$

Em todos os ensaios a seção térmica era preenchida com soja, $dp_v = 6,32\text{mm}$, enquanto a seção de entrada era preenchida com esferas de aço de 6mm de diâmetro para eliminar qualquer influência da secagem da soja nessa seção sobre a seção térmica e preservar a hidrodinâmica do sistema. Após o ensaio, os grãos de soja eram separados facilmente das esferas de aço utilizando-se um ímã.

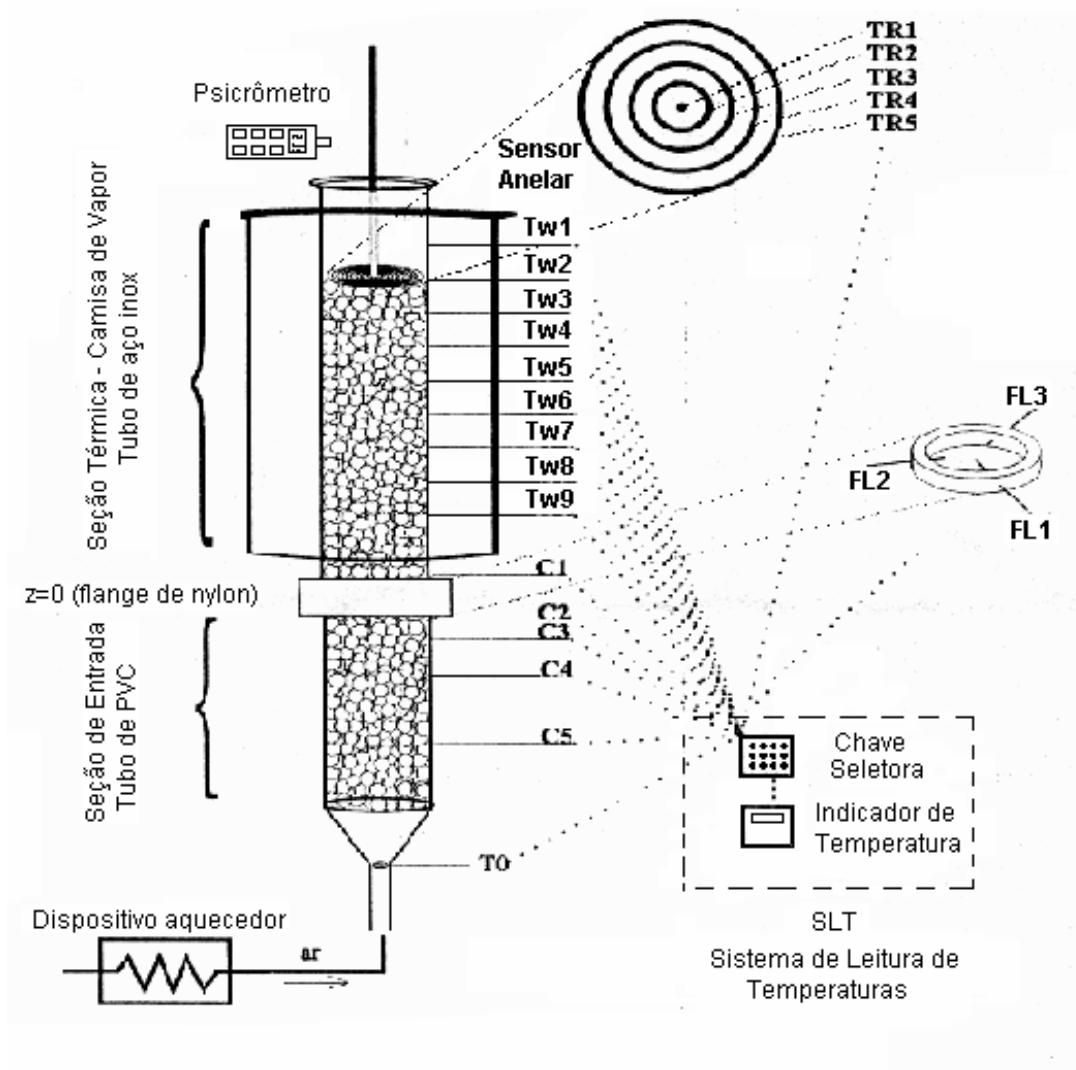


Figura 1. Visão geral do equipamento.

Os ensaios utilizados na estimativa de K_r e h_w foram efetuados seguindo a seguinte estratégia: inicialmente posicionavam-se os termopares Tw1 a Tw9, Figura 1, na parede interna do secador e preenchia-se a seção de entrada com esferas de aço; a seguir adicionava-se soja na seção térmica até à altura de 100mm em relação à flange ($z=0$ na Figura 1). Posteriormente, posicionava-se o sensor anelar sobre o leito; fixava-se a vazão de ar em 60 L/min, alimentado à temperatura ambiente 25°C ou a 60°C, e admitia-se vapor saturado na camisa de aquecimento. Aguardava-se o término da secagem, em torno de 3,5 horas, efetuavam-se todas as medidas de temperatura indicadas na Figura 1 e de umidade do ar na saída do secador.

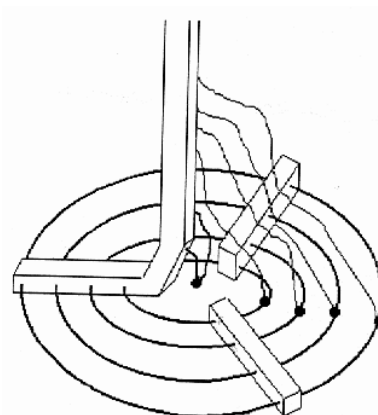


Figura 2. Sensor anelar.

Os ensaios utilizados na estimação de K_r e h_w foram efetuados seguindo a seguinte estratégia: inicialmente posicionavam-se os termopares Tw1 a Tw9, Figura 1, na parede interna do secador e preenchia-se a seção de entrada com esferas de aço; a seguir adicionava-se soja na seção térmica até à altura de 100mm em relação à flange ($z=0$ na Figura 1). Posteriormente, posicionava-se o sensor anelar sobre o leito; fixava-se a vazão de ar em 60 L/min, alimentado à temperatura ambiente 25°C ou a 60°C, e admitia-se vapor saturado na camisa de aquecimento. Aguardava-se o término da secagem, em torno de 3,5 horas, efetuavam-se todas as medidas de temperatura indicadas na Figura 1 e de umidade do ar na saída do secador.

Esse procedimento era repetido adicionando-se soja sobre o leito pré-existente até o leito alcançar a altura de 200mm e posteriormente para 300mm. Ao final dos ensaios nessas 3 alturas, com a mesma vazão de ar, o secador era descarregado e a soja prontamente separada das esferas de aço utilizando-se um imã. Depois de efetuar a separação, a soja era misturada e retirava-se uma amostra para a determinação do teor de umidade.

Após este primeiro ciclo de ensaios nas alturas de 100mm, 200mm e 300mm, repetia-se essa metodologia para as vazões de 80, 100, 120 e 140L/min.

Adicionalmente, foi feito um ensaio independente com o secador recheado de esferas de aço na seção de entrada e com a seção térmica preenchida com soja até a altura de 300mm, para avaliar o tempo de secagem e o comportamento das temperaturas, Figura 3 e da umidade do ar Figura 4 ao longo da secagem.

Nesse ensaio, os termopares, Tw1 a Tw9 (Figura 1), foram posicionados no centro do leito ($r = 0$ mm) e o sensor anelar instalado sobre o leito ($z=300$ mm). Alimentou-se o secador com uma vazão de ar de 60L/min, a temperatura ambiente (25°C), enquanto a temperatura da parede do secador foi mantida a 124°C por meio da injeção de vapor saturado ao secador.

Modelo matemático

O estudo desenvolvido corresponde ao levantamento de parâmetros térmicos em um secador de leito fixo operando em regime permanente. Essa condição é alcançada no final da secagem, quando cessa a evaporação de água do sólido para a corrente de ar quente que percola o leito e os teores de umidade do sólido e do gás entram em equilíbrio.

Ao entrar nesse regime, o valor da umidade do ar que entra no secador tende ao valor da umidade do ar na saída do secador e, a partir deste momento, em torno de 200min, ocorre apenas o processo de transferência de calor no leito de soja.

Dessa forma, o comportamento térmico do sistema, em condições de regime permanente, pode ser representado por um modelo pseudo-homogêneo, bidimensional, com dispersão axial, composto pelas Equações 2,3,4,5 e 6.

$$K_r \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + K_a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = Gc_p \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2)$$

$$r = 0 \quad \partial T / \partial r = 0 \quad (3)$$

$$r = R \quad -K_r (\partial T / \partial r) = \begin{cases} h_w (T - T_w) & z > 0 \\ h_w (T - T_0) & z < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$z = -\infty \quad T \rightarrow T_0 \quad (5)$$

$$z = +\infty \quad T \rightarrow T_w \quad (6)$$

A solução analítica desse modelo em termos de séries infinitas de funções de Bessel corresponde às Equações 7 e 8 e pode ser encontrada em Gunn e Khalid (1975) e Dixon et al. (1978).

$$\frac{T - T_w}{T_0 - T_w} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{Bi(1 + M_i)J_0\left(\beta_i \frac{r}{R}\right)}{M_i(Bi^2 + \beta_i^2)J_0(\beta_i)} \exp \frac{Pe_a(1 - M_i)z}{2d_p} \quad (7)$$

em que

$M_i = [1 + 16 \beta_i^2 d_p^2 / (R^2 Pe_a Pe_r)]^{1/2}$ e β_i são as raízes da Equação 8.

$$\beta_i J_1(\beta_i) - Bi J_0(\beta_i) = 0 \quad (8)$$

Esse modelo possui 3 parâmetros adimensionais: Bi ($=h_w R / K_r$), Pe_r ($=Gc_{pd} / K_r$) e Pe_a ($=Gc_{pd} / K_a$), os quais foram estimados conjuntamente a partir do ajuste da Equação 7 aos perfis radiais de temperatura medidos em 3 alturas de leito distintas: 10cm, 20cm e 30cm, em regime permanente, conforme descrito por Jorge (1992). A função objetivo foi definida segundo o critério dos mínimos quadrados e minimizada, utilizando-se o método de Marquardt (1963).

Resultados e discussão

Comportamento do sistema durante a secagem

Pode-se dividir os ensaios em 2 grupos: um correspondente àqueles efetuados com o ar alimentado à temperatura ambiente ($T_o = 25^\circ\text{C}$) e outro com o ar a 60°C . Em ambas as temperaturas de alimentação foram efetuados ensaios com 4 vazões de ar diferentes. A partir das medidas da umidade média dos grãos de soja que compõem o leito, pôde-se constatar que para as duas temperaturas do ar de alimentação, a umidade média do leito não sofreu influência significativa da vazão de ar.

Ao contrário da vazão, a temperatura de alimentação do ar exerce uma influência significativa sobre o teor médio de umidade do leito. Com o ar sendo alimentado a 60°C o teor de umidade médio do leito de soja ao final da secagem era desprezível, enquanto para a temperatura do ar de alimentação de 25°C o teor de umidade médio do leito era de 0,042 (b.s.).

O modelo matemático utilizado neste trabalho só é válido para condições em que não haja a evaporação de água; ou seja, após o final da secagem. Dessa forma, todas as medidas de temperatura necessárias à estimação dos parâmetros térmicos foram efetuadas após certificar-se de que o leito tivesse alcançado a condição de equilíbrio; ou seja, regime permanente.

Conforme pode-se observar nas Figuras 3 e 4, no início da secagem o leito sofre um rápido aquecimento e o teor de umidade na corrente de ar que deixa o secador ($z = 300\text{mm}$) é máximo, em torno de 0,013 b.s., diminuindo continuamente até não haver mais evaporação de água da soja para o ar circundante, fazendo que os teores de umidade do ar na entrada ($z = 0\text{mm}$) e na saída do secador tendam ao valor de 0,002 b.s., com as temperaturas já estabilizadas. Este comportamento caracteriza o fim da secagem e ocorre em torno de 3h5min. após o início desta.

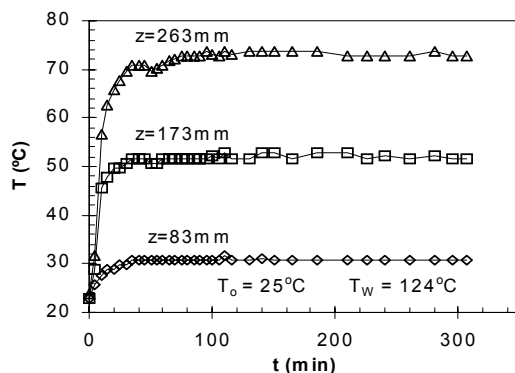


Figura 3. Temperaturas durante a secagem.

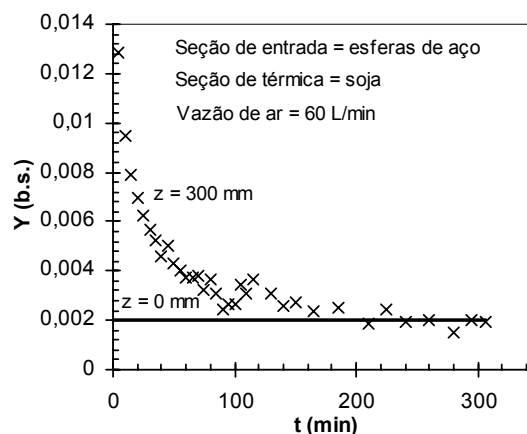


Figura 4. Umidade do ar durante a secagem.

Ajuste do modelo

A fim de se verificar a qualidade do ajuste do modelo utilizado aos dados experimentais, todas as temperaturas medidas nas diversas vazões, T_{exp} , foram comparadas com as previsões do modelo matemático, T_{calc} , conforme Figura 5.

Constata-se que a grande maioria das temperaturas calculadas pelo modelo matemático apresenta desvios em relação às temperaturas experimentais inferiores a 5%, indicando que tanto o modelo como a estratégia utilizada para o ajuste são adequados.

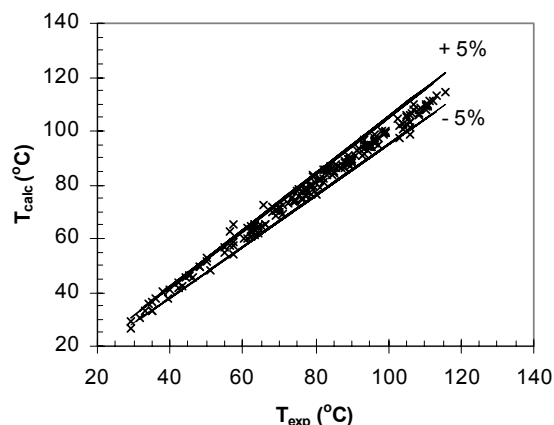


Figura 5. Verificação do ajuste do modelo.

Análise dos parâmetros térmicos

Pode-se verificar, pela análise das Figuras 6 e 7, que tanto hw como kr apresentam um comportamento aproximadamente linear e crescente com relação ao aumento da vazão e praticamente independente do teor de umidade da soja, na faixa de condições experimentais exploradas. Dessa forma, o conjunto de dados de hw e kr foram correlacionados

por regressões lineares levando em conta apenas a influência da vazão de ar.

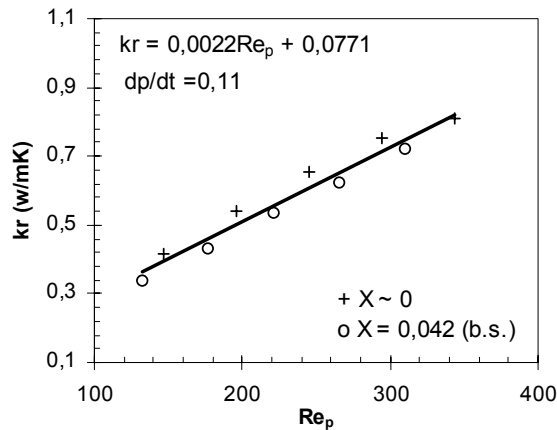


Figura 6. kr em função de Re_p .

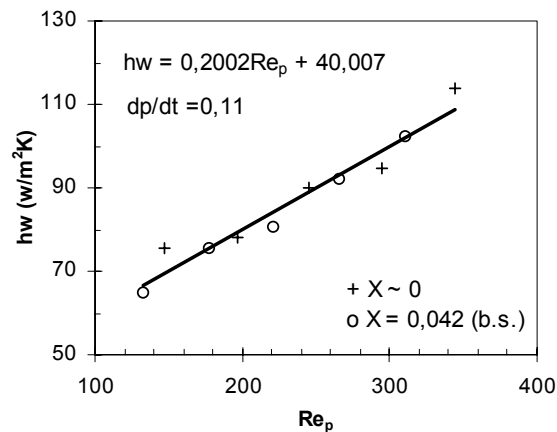


Figura 7. hw em função de Re_p .

Conclusão

A escolha de um modelo pseudo-homogêneo, bidimensional, com dispersão axial, foi satisfatório para a avaliação das propriedades térmicas efetivas radiais do leito fixo composto por grãos de soja.

Tanto a condutividade efetiva radial (kr) como o coeficiente de transferência de calor parede-leito (hw) apresentaram um comportamento crescente e linear com o aumento da vazão e foram praticamente insensíveis ao teor de umidade da soja na faixa de condições experimentais exploradas.

O teor de umidade médio do leito de soja depende da temperatura de alimentação do ar, sendo desprezível quando o ar é alimentado a 60°C e igual a 0,042 (b.s.) quando é alimentado a 25°C.

Nomenclatura

Bi	Número de Biot ($h_w R / kr$), [-]
C_p	Capacidade calorífica, [$L^2 T^{-2} \theta^{-1}$]
Dp_v	Diâmetro médio de partícula equivalente ao volume de uma esfera de igual volume, [L]
G	Densidade de fluxo mássico, [$ML^{-2} T^{-1}$]
hw	Coefficiente de transferência de calor parede-leito, [$M \theta^{-1} T^{-3}$]
K_a	Condutividade térmica efetiva axial, [$ML \theta^{-1} T^{-3}$]
K_r	Condutividade térmica efetiva radial, [$ML \theta^{-1} T^{-3}$]
n	Número de partículas, [-]
Pe_a	Número de Peclet axial ($GCpdp/K_a$), [-]
Pe_r	Número de Peclet radial ($GCpdp/K_r$), [-]
r	Posição radial, [L]
R	Raio do secador, [L]
Re_p	Número de Reynolds (Gdp_v/μ), [-]
T	Temperatura (sensor anelar), [θ]
T_{calc}	Temperatura calculada, [θ]
T_{exp}	Temperatura experimental, [θ]
T_0	Temperatura de entrada, [θ]
T_w	Temperatura da parede, [θ]
V	Volume, [L^3]
X	Umidade do sólido em base seca (b.s.), [-]
Y	Umidade do ar b.s., [-]
z	Posição axial, [L]

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Pibic-CNPq/UEM pelo auxílio financeiro concedido.

Referências

- CALADO, V.M.A.; BISCAIA JR, E.C. Modelagem e simulação de secadores de grãos em leito fixo. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 2., 1992, São Carlos. *Anais...* São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 1992. p. 381 – 392.
- CALÇADA, L.A. et al. Modelagem e simulação de secadores em leito fixo, In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 2., 1993, Ouro Preto. *Anais...* Ouro Preto: Universidade Federal de Minas Gerais, 1993. p. 384 – 394.
- COSTA, M.V.A. et al. Propriedades térmicas de transporte de alimentos sólidos granulares. In: XXVI ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 1., 1998, Teresópolis. *Anais...* Teresópolis: Universidade Rural do Rio de Janeiro, 1998. p. 75 – 82.
- DA SILVA, S.L.; SANCHEZ DE ALSINA, O.L. Condutividade térmica na estagnação de um leito de feijão. In: XV ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 1., 1987, Uberlândia. *Anais...*

- Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 1987. p. 173 –179.
- DIXON, A.G. *et al.* Heat transfer in packed beds of low tube / particle diameter ratio. *ASC Symp. Series*, v. 65, p. 238 – 253, 1978.
- GUNN, D.J.; KHALID, M. Thermal dispersion and wall heat transfer in packed beds. *Chem. Eng. Sci.*, Amsterdam, v. 30, p. 261-267, 1975.
- JORGE, L.M.M. *Transferência de calor em reator catalítico de leito fixo*. 1992. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- MARQUARDT, D. W. An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Indust. Appl. Math.*, v. 11, n. 2, p. 431 – 441, 1963.
- MHIMID, A.; BENNASRALLAH, S. Theoretical study of heat and mass transfers during drying of granular products. In: TUNER, L. (Ed.) *Mathematical modeling and numerical techniques in drying technology*. New York: Marcel Dekker, 1997. cap 3, p.381-413.
- SPENCER, H.B. A mathematical simulation of grain drying. *J. Agric. Eng. Res.*, London, v.14, n.4, p. 226-235, 1969.

Received on March 07, 2003.

Accepted on June 15, 2003.