

# ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS EFETIVAS DE GRÃOS EM UM SECADOR DE LEITO FIXO<sup>1</sup>

L. V. FREGOLENTE<sup>2</sup>, O. A. A. SANTOS<sup>2</sup>, L. M. M. JORGE<sup>2,\*</sup>

## RESUMO

A secagem de grãos em leito fixo é um processo complexo, ocorrendo simultaneamente a transferência de calor e de massa, dificultando a estimativa dos parâmetros térmicos efetivos, pois estes podem sofrer variações significativas no decorrer da secagem em função de alterações no teor de umidade. Neste trabalho, este problema foi contornado estimando-se os parâmetros térmicos efetivos no final da secagem, quando o teor de umidade dos grãos que compõem o leito alcança valores de equilíbrio, deixando de existir a transferência de massa, persistindo apenas a transferência de calor em regime permanente. Nestas condições, o leito possui um teor de umidade constante e a estimativa dos parâmetros térmicos efetivos pode ser efetuada a partir do ajuste de um modelo pseudo-homogêneo bidimensional estático à várias medidas de temperatura no leito de grãos no final da secagem. Os resultados indicam que a estratégia utilizada para estimativa da condutividade térmica efetiva radial e do coeficiente efetivo de transferência de calor parede-leito foi adequada. Além do que, constatou-se que dentre os grãos estudados – soja, feijão, milho e trigo – a soja apresenta os menores valores de condutividade efetiva radial, enquanto o trigo apresenta o maior valor do coeficiente de transferência de calor parede-leito.

**Palavras-chave:** secagem de grãos; propriedades térmicas efetivas; leito fixo.

## SUMMARY

ESTIMATION OF EFFECTIVE GRAIN THERMAL PROPERTIES IN A FIXED BED DRYER. Fixed bed grain drying is a complex process, where mass and heat transfer occur simultaneously, complicating the estimation of the effective thermal parameters, because they can go through significant variations along the drying process, due to moisture content variations. In this work, this problem was avoided by estimating the effective thermal parameters at the end of the drying process, when the grain moisture content reaches equilibrium, and mass transfer stops, persisting only the steady state heat transfer. In these conditions, the bed has a constant moisture content and the estimation of the effective thermal parameters can be obtained from the adjustment of a steady state two-dimensional pseudohomogeneous model to several fixed bed temperature measurements at the end of the drying process. The results show that the strategy used to evaluate the effective thermal conductivity and the effective wall heat transfer coefficient was appropriate. In addition, among the grains analysed – soy, bean, corn and wheat-, soy presents the smallest values of effective radial conductivity, while wheat presents the greatest effective wall heat transfer value.

**Keywords:** grain drying; effective thermal properties; fixed bed.

## 1 – INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades térmicas efetivas é de grande importância para o projeto, simulação, análise, otimização e controle de processos não-isotérmicos em leito fixo. Por sua vez, estes processos podem ocorrer na ausência ou na presença de transferência de massa.

Regeneradores de calor de leito fixo são um exemplo de equipamento industrial no qual ocorre apenas a transferência de calor, enquanto reatores químicos não-isotérmicos e secadores de leito fixo exemplificam equipamentos onde ocorre simultaneamente a transferência de calor e de massa na presença e na ausência de reação química, respectivamente.

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 grãos.

Dentre os trabalhos que abordam a estimativa de propriedades térmicas efetivas de leitos fixos compostos por grãos, pode-se citar: FREGOLENTE, CALIANI & JORGE [8], COSTA et al. [4] e DA SILVA & SANCHEZ DE ALSINA [5].

A escassez de trabalhos voltados à determinação de propriedades térmicas efetivas em secadores de grãos em leito fixo, pode em parte ser creditada ao uso corrente de modelos heterogêneos para descrever o processo de secagem, tais como: SOUZA, PASSOS & BISCAIA JR. [16]; MHIMID & BENNASRALLAH [15]; CALÇADA, BISCAIA JR. & MASSARANI [3] e CALADO & BISCAIA JR. [2].

A preferência por modelos heterogêneos, também chamados de modelos a duas fases, pode se justificar devido ao caráter endotérmico da secagem em leito fixo, aliado à resistência dominante à transferência de massa no interior dos grãos de cereais, conforme constatado por MANCINI [13] e BARROZO, HENRIQUE & SARTORI [1].

Estes efeitos podem promover o surgimento simultâneo de elevados gradientes de temperatura e de umidade entre as fases, limitando a utilização da abordagem pseudo-homogênea.

Os modelos heterogêneos abordam a fase fluida e a fase sólida do leito separadamente e podem repre-

<sup>1</sup> Recebido para publicação em 25/04/2003. Aceito para publicação em 12/05/2004 (001113).

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá. Av. Colombo, 5790, Bloco D 90, Maringá – PR- Brasil, CEP 87020-900. E-mail: leoeq@hotmail.com, onelia@deq.uem.br, lmmj@deq.uem.br

\* A quem a correspondência deve ser enviada.

sentar os perfis de temperatura e de umidade em ambas as fases no decorrer da secagem.

Do ponto de vista térmico, a simulação destes modelos depende do conhecimento de parâmetros térmicos elementares, tais como o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a partícula e o fluido adjacente e a condutividade térmica do sólido que compõe a partícula.

Por sua vez, a utilização de propriedades térmicas efetivas para fins de modelagem e simulação de processos em leito fixo está diretamente relacionada ao uso de modelos pseudo-homogêneos, também chamados modelos a uma fase.

Estes modelos tratam indistintamente as fases fluida e sólida como uma fase pseudo-homogênea, cujas propriedades térmicas do meio pseudo-homogêneo são denominadas de propriedades térmicas efetivas.

Enquanto os modelos heterogêneos são obtidos a partir de balanços de massa e de energia em ambas as fases, os modelos pseudo-homogêneos são compostos por um número menor de equações, decorrentes de balanços de energia e de massa em apenas uma fase, denominada pseudo-homogênea.

Apesar da utilização de modelos pseudo-homogêneos serem de uso corrente nos estudos de processos em leito fixo na ausência e na presença de reações químicas, a sua utilização em sistemas envolvendo a secagem de grãos em leito fixo tem sido bastante restrita.

Estes modelos podem ser convenientes para fins de controle e otimização de secadores de leito fixo, devido a sua maior simplicidade e menor tempo de simulação.

Se por um lado a utilização de um modelo pseudo-homogêneo ou heterogêneo para fins de simulação envolve a necessidade do conhecimento dos parâmetros térmicos, nem sempre disponíveis em literatura; por outro, a estimativa dos parâmetros do modelo envolve a seleção de um modelo adequado que contemple os principais aspectos relacionados ao processo de interesse.

Por sua vez, a secagem é um processo complexo onde ocorrem simultaneamente as transferências de calor e de massa, o que pode dificultar a estimativa das propriedades térmicas efetivas.

Além do consumo de energia devido à evaporação da água contida no cereal, as propriedades térmicas efetivas podem sofrer variações significativas em função da diminuição do teor de umidade nos grãos ao longo da secagem, conforme indicam os resultados obtidos por DA SILVA & SANCHEZ DE ALSINA [5] com feijão.

No início da secagem, a evaporação de água é mais pronunciada, diminuindo ao longo do tempo, tornando-se nula ao final desta. Neste momento, os efeitos de transferência de massa tornam-se desprezíveis e o leito tende a alcançar teores de umidade de equilíbrio.

A partir daí o leito tende a alcançar a condição de regime permanente, ocorrendo apenas a transferência de calor. Desta forma, pode-se aproveitar a inexistência da transferência de massa no final do processo de

secagem para estimar os parâmetros térmicos efetivos do leito, utilizando-se para tal um modelo mais simples que contemple apenas a transferência de calor em regime permanente.

Neste trabalho, foram estimadas as propriedades térmicas do leito fixo composto por grãos de soja, milho, trigo e feijão carioca a partir do ajuste de um modelo pseudo-homogêneo, bidimensional estático, aos perfis experimentais de temperatura, obtidos em diversos ensaios num secador cilíndrico de leito fixo, aquecido pela parede, operando em condições de regime permanente a várias vazões de ar.

## 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 – Matérias-primas

Foram utilizados cinco tipos de grãos nos ensaios: soja, feijão carioca, milho e trigo. O trigo foi doado pela Cooperativa dos Cafeicultores de Maringá (COCAMAR), enquanto a soja, o milho e o feijão carioca foram adquiridos junto a cerealistas da região. As principais características dos grãos antes da secagem (subscrito i) e no final da secagem (subscrito f), são apresentadas na *Tabela 1*. Tanto o diâmetro médio dos grãos ( $d_p$ ) como a porosidade média do leito fixo ( $\epsilon$ ) composto por estes não apresentaram alterações durante a secagem.

**TABELA 1.** Caracterização dos grãos

	Soja	Feijão	Milho	Trigo
$d_p$ (cm)	0,551	0,666	0,743	0,379
$\rho_i$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,45	1,56	1,30	1,32
$\epsilon$	0,49	0,46	0,38	0,35
$X_i$ (b.s.)	0,0999	0,152	0,134	0,132
$X_f$ (b.s.)	0,0483	0,0575	0,0559	0,0446

### 2.2 – Equipamentos

O equipamento utilizado neste trabalho encontra-se ilustrado na *Figura 1*. O secador é composto de duas seções distintas: uma seção térmica de 40cm de comprimento, construída em aço inoxidável, 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 encontram-se unidas por meio de uma flange de nylon, a fim de minimizar a transferência de calor entre as seções. O vapor saturado utilizado no aquecimento da seção térmica foi fornecido por uma autoclave, enquanto o ar, por um soprador.

A vazão de ar foi ajustada com o auxílio de um anemômetro de ventoinha de 6cm de diâmetro interno (OMEGA, modelo HH-F10), acoplado à saída da seção térmica, enquanto o teor de umidade do ar que deixa o

secador foi avaliado por meio de um psicrômetro digital (AMPROBE, modelo THWD-1).

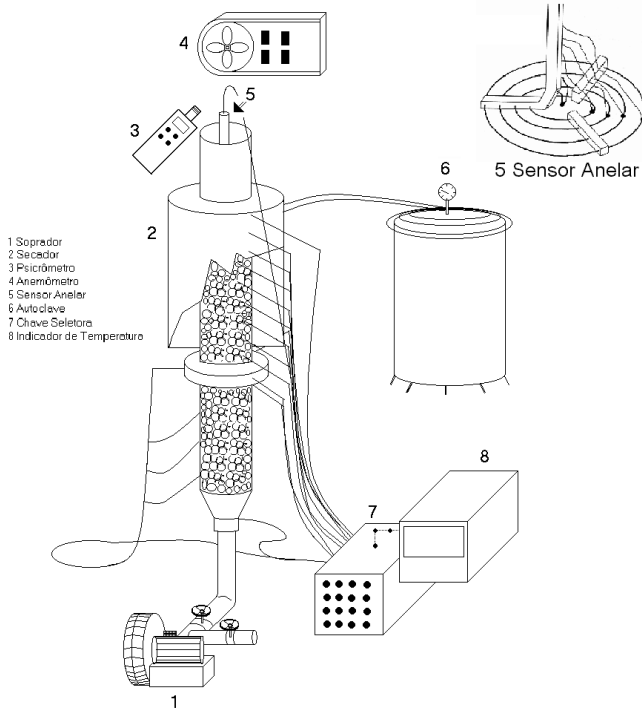


FIGURA 1. Esquema do aparato experimental utilizado.

Um sensor anelar (Figura 1) capaz de avaliar as temperaturas médias angulares em cinco posições radiais distintas (termopares 1 a 5, indicados na Figura 2) foi fixado sobre o leito composto por grãos: soja, feijão carioca, milho ou trigo.

Termopar	z (mm)	r (mm)
22	-60	30
21	-20	30
20	-8	30
19	0	30
18	5	30
17	0	0
16	0	22
15	0	30
14	53	0
13	83	0
12	113	0
11	143	0
10	173	0
9	203	0
8	233	0
7	263	0
6	293	30
5	300	0
4	300	8
3	300	15
2	300	21
1	300	27

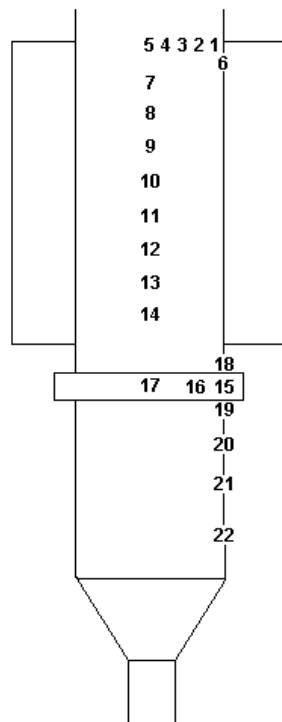


FIGURA 2. Posições dos termopares no secador de leito fixo.

Este sensor é composto por quatro anéis concêntricos, espaçados entre si por pequenas barras de nylon e suportado por uma haste de nylon. Os anéis são constituídos por fios de cobre de 2,5mm de diâmetro e cada um possui um mini termopar soldado. Além destes, há um quinto mini termopar soldado junto a uma pequena haste de cobre fixada no centro do sensor. Detalhes adicionais podem ser vistos no trabalho de GIUDICI & NASCIMENTO [9].

A temperatura da parede da seção térmica foi monitorada por um termopar posicionado na parede desta seção, termopar 6. No centro do leito, as temperaturas em diferentes posições axiais foram monitoradas por meio de oito termopares inseridos radialmente através da seção térmica e posicionados no centro, termopares 7 a 14, conforme Figura 2.

Entre as duas seções, o perfil radial de temperatura pôde ser avaliado por meio de três termopares inseridos radialmente através da flange e, posicionados em três posições distintas, conforme apontado na Figura 2.

A temperatura do ar que entra no secador é medida por meio de um pequeno termopar posicionado imediatamente abaixo da seção de entrada, fixado no centro do tubo de alimentação do ar. Todos os termopares são do tipo K e foram ligados a uma chave seletora conectada a um indicador de temperatura.

### 2.3 - Procedimento experimental

O procedimento experimental foi dividido em duas etapas distintas: 1ª) determinação da umidade média do leito; 2ª) levantamento dos perfis de temperatura. A única diferença entre os ensaios efetuados segundo estas duas etapas corresponde ao recheio empregado na seção de entrada do secador. Em ambas as etapas, os ensaios eram efetuados nas mesmas condições operacionais e com grãos provenientes do mesmo lote.

Após preencher o secador com esferas de aço de 3mm na seção de entrada e com um determinado grão na seção térmica (1ª etapa) ou apenas com grãos nas duas seções (2ª etapa), injetou-se vapor saturado a 123°C na camisa da seção térmica do secador e ar numa vazão predeterminada: 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 ou 1,4m/s.

As temperaturas no leito e a umidade do ar na saída do secador foram acompanhadas até que estas não variassem mais, indicando o estabelecimento do equilíbrio térmico e mássico entre as partículas do leito e o ar circundante, caracterizando a condição de regime permanente e o fim da secagem, o que demorava em torno de duas horas.

Paralelamente, foram realizados alguns experimentos com duas pequenas alíquotas de grãos, separadas antes do ensaio e no final do ensaio, a fim de se avaliar o teor de umidade ( $X_1$ ) e densidade ( $\rho_1$ ) iniciais e diâmetro médio de partícula ( $d_p$ ), que foram apresentados na Tabela 1.

O teor de umidade inicial dos grãos,  $X_1$  (b.s.), foi determinado pelo método clássico de levar uma amostra à estufa a 105°C por 48 horas ou até peso constan-

te [11], enquanto a densidade ( $\rho$ ) e o diâmetro médio de partícula baseado no diâmetro de uma esfera de igual volume ( $d_p$ ) foram avaliados por picnometria.

O teor de umidade médio do leito ao final da secagem,  $X_f$  (b.s.), foi avaliado a partir dos ensaios efetuados com a seção de entrada preenchida com esferas de aço e a seção térmica preenchida com grãos (1ª etapa), da seguinte forma:

- antes de iniciar a secagem, preencheu-se a seção de entrada do secador com esferas de aço, mediu-se a massa de grãos utilizada para preencher a seção térmica do secador e se determinou o teor de umidade inicial dos grãos;
- conhecidos o teor de umidade,  $X_i$  (b.s.), e a massa de grãos,  $m_{ini}$ , calculou-se a massa de sólidos secos,  $m_{ss}$ , e a massa de água contida inicialmente no leito de grãos,  $m_{H_2O}$ ;
- ao final da secagem, separou-se os grãos das esferas de aço, utilizando-se um imã, pesou-se a massa de grãos secos e se avaliou a quantidade de água evaporada,  $m_{evap}$ , pela diferença entre a massa de grãos no início,  $m_{ini}$ , e no final do ensaio,  $m_{fim}$ ;
- a partir da diferença entre a massa de água existente no leito de grãos no início da secagem e a massa de água evaporada,  $m_{evap}$ , calculou-se a massa de água residual,  $m_{res}$ ;
- determinou-se o teor de umidade médio dos grãos na seção térmica no final da secagem,  $X_f$  (b.s.), dividindo-se  $m_{res}$  por  $m_{ss}$ ;

A porosidade média do leito ( $\epsilon$ ) corresponde à razão entre o volume de vazios ( $V_v$ ) e o volume da seção térmica ( $V_{st}$ ). O volume da seção térmica foi calculado a partir da altura,  $H$ , e do diâmetro,  $D$ , desta seção e corresponde a  $\pi.D^2.H/4$ . Por sua vez, o volume de vazios corresponde à diferença entre  $V_{st}$  e o volume dos grãos ( $V_s$ ); onde:  $V_s = m_{ini} / \rho_i$ .

### 2.4 - Modelo matemático

Ao final da secagem, a transferência de massa entre os grãos e o ar circundante deixa de existir e o sistema alcança condições de regime permanente. Nesta condição, só há a transferência de calor e o comportamento térmico do sistema pode ser representado por um modelo pseudo-homogêneo, bidimensional com dispersão axial representado pelas Equações 1, 2, 3, 4 e 5.

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

$$r = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (2)$$

$$r = R \quad -k \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \begin{cases} h_w(T - T_w) & z > 0 \\ h_w(T - T_0) & z < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$z = -\infty \quad T \rightarrow T_0 \quad (4)$$

$$z = +\infty \quad T \rightarrow T_w \quad (5)$$

A solução analítica deste modelo, em termos de séries infinitas de funções de Bessel, corresponde às Equações 6 e 7, e pode ser encontrada em GUNN & KHALID [10] e DIXON & PATERSON [7].

$$\frac{T - T_w}{T_0 - T_w} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{Bi(1 + M_i) J_0 \left( \beta_i \frac{r}{R} \right) \exp \left( -Pe_a(1 - M_i)z \right)}{M_i (Bi^2 + \beta_i^2) J_0(\beta_i)} \frac{Pe_a(1 - M_i)z}{2d_p} \quad (6)$$

onde

$$M_i = \left[ 1 + 16\beta_i^2 d_p^2 / (R^2 Pe_a Pe_r) \right]^{1/2} \text{ e } b_i \text{ são as raízes da equação (7).}$$

$$\beta_i J_1(\beta_i) - Bi J_0(\beta_i) = 0 \quad (7)$$

### 2.5 - Determinação dos parâmetros térmicos do modelo

A solução analítica do modelo apresentado acima, Equação 6, possui três parâmetros adimensionais:

$$Bi = \frac{h_w R}{k_r}, \quad Pe_r = \frac{Gc_p d_p}{k_r} \quad \text{e} \quad Pe_a = \frac{Gc_p d_p}{k_a}$$

os quais foram estimados conjuntamente pelo ajuste da Equação 6 aos perfis de temperatura medidos na seção térmica do secador em condição de regime permanente.

O ajuste foi efetuado a partir da definição de uma função objetivo pelo método dos mínimos quadrados, a qual foi minimizada utilizando-se o algoritmo de MARQUARDT [14]. Maiores detalhes podem ser encontrados no trabalho de JORGE [12].

## 3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para assegurar a condição de regime permanente, onde os grãos alcançam teores de umidade de equilíbrio e cessa a transferência de massa, tanto a temperatura no leito como a umidade do ar na saída do secador foram avaliadas ao longo do tempo até permanecerem constantes.

Nas Figuras 3 e 4, são apresentados os resultados do acompanhamento das temperaturas num leito de feijão carioca (Figura 3) e da umidade do ar na saída do secador (Figura 4), em duas vazões de ar.

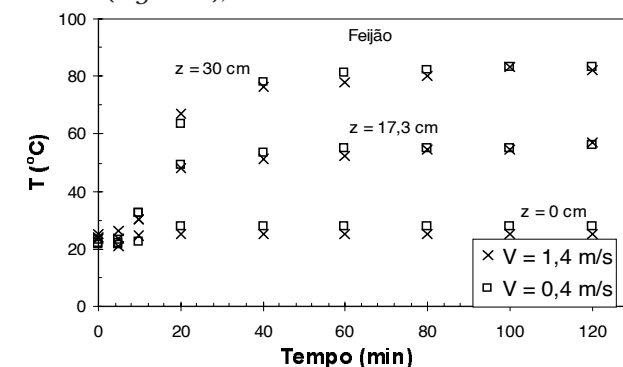
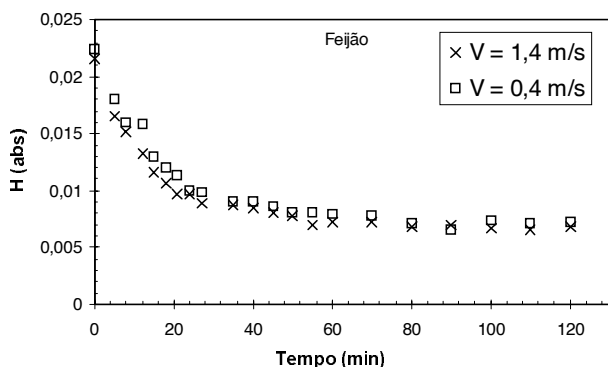


FIGURA 3. Perfis de temperatura ao longo do tempo.



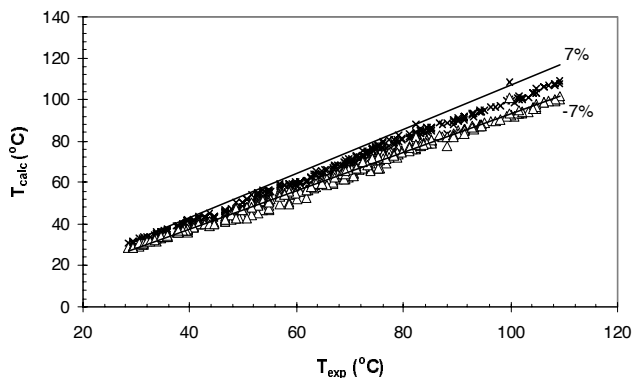


**FIGURA 4.** Perfil de umidade do ar na saída do secador ao longo do tempo.

Pode-se observar que na faixa de vazões de ar utilizadas (0,4 a 1,4m/s) o secador demora em torno de duas horas para alcançar a condição de regime permanente. Além do que, a vazão não exerce influência significativa sobre os perfis de temperatura (*Figura 3*) nem sobre os perfis de umidade (*Figura 4*), indicando que a transferência de massa no interior das partículas de feijão corresponde à etapa limitante durante o processo de secagem.

Comportamento similar foi observado para todos os grãos estudados, como também foi constatado por MANCINI [13] e BARROZO, HENRIQUE & SARTORI [1].

A fim de se verificar a qualidade do ajuste do modelo utilizado aos dados experimentais, todas as temperaturas mediadas nas diversas vazões ( $T_{exp}$ ) com o secador recheado com os quatro grãos: feijão carioca, soja, milho e trigo, foram comparadas com as previsões do modelo matemático ( $T_{calc}$ ) conforme mostra a *Figura 5*.

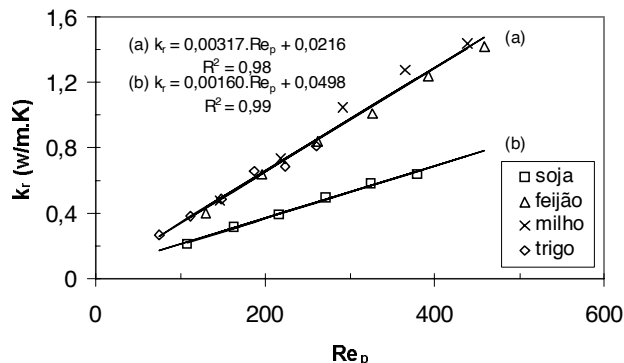


**FIGURA 5.** Verificação da qualidade do ajuste do modelo aos dados experimentais.

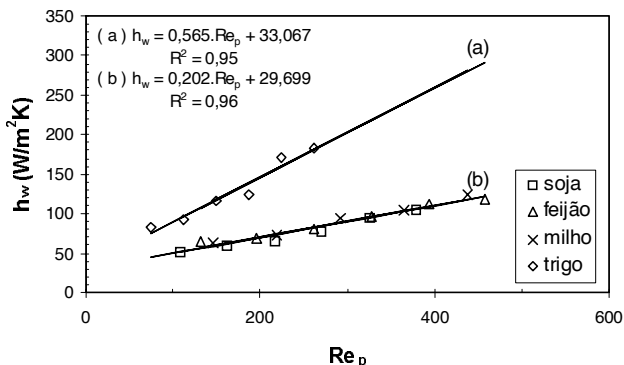
Nota-se que a grande maioria das temperaturas calculadas pelo modelo matemático apresenta desvios inferiores a 7% em relação às temperaturas experimentais, indicando que tanto o modelo como a estratégia utilizada para o ajuste são adequados.

Analisando-se o comportamento da condutividade térmica efetiva radial ( $k_r$ ) e do coeficiente efetivo de transferência de calor parede-leito ( $h_w$ ), nas *Figuras 6 e 7*, pode-se constatar que ambos apresentam um com-

portamento linear e crescente em função do número de Reynolds ( $Re_p = G.dp/\mu$ ), podendo ser bem correlacionado por funções lineares. Entretanto, a soja no caso de  $k_r$  e o trigo no caso de  $h_w$  apresentarem valores bastante diferentes dos demais grãos, com uma tendência de ampliação desta diferença com o aumento da vazão.



**FIGURA 6.** Condutividade térmica efetiva radial ( $k_r$ ) para diferentes grãos.



**FIGURA 7.** Coeficiente de transferência de calor ( $h_w$ ) para diferentes grãos.

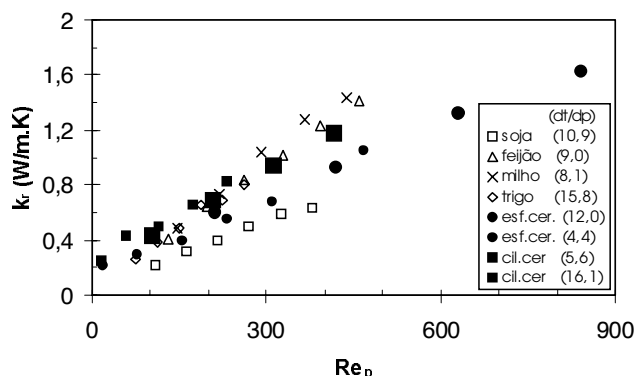
Segundo DIXON [6], tanto o tamanho, representado pela razão entre os diâmetros de tubo ( $dt$ ) e de partícula ( $dp$ ), como a forma, a condutividade térmica do sólido e a vazão, podem afetar as propriedades térmicas efetivas do leito.

Desta forma, julgar porque a soja apresentou valores diferenciados de  $k_r$  e o trigo de  $h_w$  não é uma tarefa fácil, pois trata-se de grãos diferentes, com formas, tamanhos e constituições diferenciadas entre si.

Entretanto, uma análise comparativa do comportamento dos parâmetros térmicos de todos os leitos de grãos com o comportamento dos parâmetros térmicos de leitos compostos por partículas de materiais cerâmicos com formas definidas, esferas e cilindros, abrangendo a faixa de razões entre  $dt$  e  $dp$  dos grãos pode indicar algumas respostas. Os dados de  $k_r$  e  $h_w$  para leitos de esferas e cilindros cerâmicos, utilizados neste trabalho, foram retirados do trabalho de JORGE[12].

Conforme pode-se observar na *Figura 8*, a influência da razão  $dt/dp$  sobre  $k_r$  de esferas e cilindros cerâmicos é pouco expressiva. Entretanto, os valores de  $k_r$

para cilindros são superiores aos das esferas, evidenciando a influência da forma das partículas sobre  $k_r$ . Neste contexto, o comportamento do  $k_r$  do leito de soja parece se aproximar do comportamento do  $k_r$  das esferas cerâmicas, enquanto o comportamento do  $k_r$  dos demais grãos: feijão, milho e trigo, aproxima-se mais do comportamento de cilindros cerâmicos.



**FIGURA 8.** Comparação de valores de  $k_r$  de grãos com  $k_r$  de materiais cerâmicos.

Curiosamente, dentre as matérias-primas estudadas, os grãos de soja são os que mais se aproximam da forma esférica, e, talvez, seja este um dos principais fatores do comportamento diferenciado. Enquanto os demais grãos: feijão, trigo e milho, apresentam um comportamento similar entre si, independente da forma, e próximo àquele observado para cilindros cerâmicos, conforme *Figura 8*.

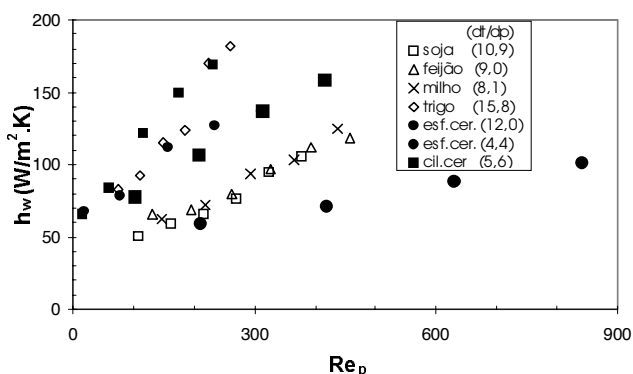
Considerando-se apenas os parâmetros térmicos dos materiais cerâmicos apresentados nas *Figuras 8 e 9*, fica evidente que a influência da razão  $dt/dp$  sobre o coeficiente de transferência de calor parede-leito ( $h_w$ ) é muito mais pronunciada do que sobre  $k_r$ . Além do que, tanto para esferas como para cilindros cerâmicos,  $h_w$  aumenta conforme a razão  $dt/dp$  aumenta.

Este fato pode contribuir para explicar os valores diferenciados de  $h_w$  do trigo em relação aos demais grãos: soja, feijão e milho, conforme pode-se observar na *Figura 9*. Enquanto estes grãos apresentam razões entre  $dt$  e  $dp$  na faixa de 8,1 a 10,9, o trigo apresenta um valor expressivamente maior (15,8) em relação aos demais, justificando valores de  $h_w$  significativamente maiores.

Pode-se ainda observar, na *Figura 9*, que o leito composto pelo grão de menor diâmetro de partícula, o trigo ( $dt/dp= 15,8$ ) apresenta valores intermediários entre os valores de  $h_w$  dos leitos compostos pelas menores esferas ( $dt/dp= 12,0$ ) e os menores cilindros cerâmicos ( $dt/dp= 16,1$ ). Considerando-se as razões entre  $dt$  e  $dp$ , pode-se afirmar que o leito de trigo apresenta valores de  $h_w$  mais próximos do leito de cilindros cerâmicos do que das esferas.

Tanto  $h_w$  como  $k_r$  são parâmetros térmicos efetivos que representam efeitos combinados de transferência de calor na fase sólida e na fase fluida. Dentre estes efeitos, a condutividade térmica da fase sólida, repre-

sentada pelos grãos, também pode exercer alguma influência, mas esta constatação depende do conhecimento dos valores das condutividades térmicas nos grãos de soja, feijão, milho e trigo, por ora indisponíveis.



**FIGURA 9.** Comparação de valores de  $h_w$  de grãos com  $h_w$  de materiais cerâmicos.

### 3.1 - Nomenclatura

- Bi Número de Biot, [-]
- $c_p$  Capacidade calorífica, [L<sup>2</sup>T<sup>-2</sup>θ<sup>-1</sup>]
- $d_p$  Diâmetro médio de partícula equivalente ao volume de uma esfera de igual volume, [L]
- $dt$  Diâmetro interno do secador, [L]
- G Densidade de fluxo mássico, [ML<sup>-2</sup>T<sup>-1</sup>]
- H Umidade absoluta do ar, [-]
- $h_w$  Coeficiente de transferência de calor parede-leito, [Mθ<sup>-1</sup>T<sup>-3</sup>]
- $k_a$  Condutividade térmica efetiva axial, [MLθ<sup>-1</sup>T<sup>-3</sup>]
- $k_r$  Condutividade térmica efetiva radial, [MLθ<sup>-1</sup>T<sup>-3</sup>]
- $Pe_a$  Número de Peclet axial, [-]
- $Pe_r$  Número de Peclet radial, [-]
- r Posição radial, [L]
- R Raio do secador, [L]
- $Re_p$  Número de Reynolds, [-]
- t Tempo, [T]
- T Temperatura, [θ]
- $T_0$  Temperatura de entrada, [θ]
- $T_{calc}$  Temperatura calculada pelo modelo, [θ]
- $T_{exp}$  Temperatura experimental, [θ]
- $T_w$  Temperatura da parede, [θ]
- V Velocidade superficial, [L/T]
- $X_f$  Umidade final do sólido em base seca(b.s), [-]
- $X_i$  Umidade inicial do sólido em base seca(b.s), [-]
- z Posição axial, [L]
- ε Porosidade média do leito, [-]
- $\rho_i$  Densidade do grão, [ML<sup>-3</sup>]
- μ Viscosidade, [ML<sup>-1</sup>T<sup>-1</sup>]

#### 4 – CONCLUSÕES

- O modelo matemático representou satisfatoriamente os dados experimentais, mediante ajuste de  $B_i$ ,  $Pe_r$  e  $Pe_a$ .
- Tanto  $k_r$  como  $h_w$  apresentam um comportamento crescente e linear com o aumento da vazão.
- O leito de soja apresentou menores valores de  $k_r$  em relação aos demais grãos, ocorrendo o aumento desta diferença conforme aumenta-se a vazão de ar.
- As condutividades térmicas efetivas do trigo, do feijão e do milho são praticamente iguais nas condições experimentais exploradas.
- Os valores de  $k_r$  do leito de soja se aproximam dos valores obtidos com leito de esferas cerâmicas, enquanto os valores de  $k_r$  do leito composto por feijão, milho e trigo se aproximam daqueles obtidos em leitos de cilindros cerâmicos.
- O leito de trigo apresentou maiores valores de  $h_w$  em relação aos demais grãos, havendo aumento desta diferença com o aumento da vazão de ar.
- Os coeficientes efetivos de transferência de calor parede-leito da soja, feijão e milho são praticamente iguais nas condições experimentais exploradas.
- Os valores de  $h_w$  do leito de trigo –  $dt/dp=15,8$  – aproximam-se dos valores apresentados pelo leito de cilindros cerâmicos –  $dt/dp= 16,1$  – com razão entre  $dt$  e  $dp$  equivalente.

#### 5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BARROZO, M.A.S.; HENRIQUE, H.M.; SARTORI, D.J.M. Secagem de Grãos em Camada Delgada um Estudo Sobre o Modelo "Fickiano". XXI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, v. II, p. 375-383, 1993.
- [2] CALADO, V.M.A.; BISCAIA Jr., E.C. Modelagem e Simulação de Secadores de Grãos em Leito Fixo. XX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, v. II, p. 381-392, 1992.
- [3] CALÇADA, L.A.; BISCAIA Jr., E.C. e MASSARANI, G. Modelagem e Simulação de Secadores de Leito Fixo. XXI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, v. II, p. 384-385, 1993.
- [4] COSTA, M.V.A.; KRONKA, G.Z.; PEREIRA, C.G.; PORTELLINHA, L.T.; THOMÉO, J.C. Propriedades Térmicas de Transporte de Alimentos Sólidos Granula-

res. XXVI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, v. I, p. 75-82, 1998.

- [5] DA SILVA, S.L.; SANCHEZ DE ALSINA, O.L. Condutividade Térmica na Estagnação de um Leito de Feijão. XV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, v. I, p. 173-179, 1987.
- [6] DIXON, A.G. Wall and Particle-shape Effects on Heat Transfer in Packed Beds. **Chem. Eng. Comm.**, v. 71, p. 217-237, 1988.
- [7] DIXON, A. G.; PATERSON, W. R. Heat Transfer in Packed Beds of Low Tube/Particle Diameter Ratio, ACS symp. Series, v. 65, p. 238-253, 1978.
- [8] FREGOLENTE, L.V.; CALIANI, E. e JORGE; L.M.M.J. Avaliação das Propriedades Térmicas de um Leito Fixo de Soja com Umidade Desprezível, Congresso Brasileiro de Engenharia Química – Iniciação Científica, CD do evento, 2001.
- [9] GIUDICI, R.; NASCIMENTO, C. A. O. Analysis of a Ring-shaped Sensor for Use in Packed-bed Heat Transfer Studies, **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 72, p. 43-49, 1994.
- [10] GUNN, D.J.; KHALID, M. Thermal Dispersion and Wall Heat Transfer in Packed Beds. **Chemical Engineering Science**, v. 30, p. 261-267, 1975.
- [11] INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz. 3.ed. São Paulo, 1985. v.1 – Métodos químicos e físicos para análise de alimentos.
- [12] JORGE, L.M.M. **Transferência de Calor em Reator Catalítico de Leito Fixo**. São Paulo, 1992, 157p. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP).
- [13] MANCINI, M.C. **Transferência de Massa em Secadores de Grãos**. Rio de Janeiro, 1996, 142p. Tese de Doutorado, COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).
- [14] MARQUARDT, D.W. An algorithm for least squares estimation of non linear parameters. **J. Soc. Indust. Appl. Math.**, v.11, n.2, p. 431-441, 1963.
- [15] MHIMID, A.; BEN NASRALLAH, S. Theoretical Study of Heat and Mass Transfer During Drying of Granular Products. In: Mathematical Modeling and Numerical Techniques in Drying Technology, Marcel Dekker, Inc. New York, 1993. Section III, p. 381-413.
- [16] SOUZA, D.F.S.; PASSOS, M.L.; BISCAIA Jr., E.C. Avaliações de Expressões de Taxa de Secagem de Sólidos. XXIX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, CD do evento, 2001.

#### 6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PIBIC-CNPq/UEM pelo auxílio financeiro concedido, bem como aos alunos Edilson Sadayuki Omota, Ubyratam Gobbi Oliveira e Vinicius Bordim pela ajuda no decorrer dos ensaios.