

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DIFUSIVO DE
TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM FARELO DE SOJA VIA ESTIMAÇÃO
DE PARÂMETROS****Arlindo Soares Räder**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Rua Luiz Englert s/nº
90040-040, Porto Alegre-RS-Brasil
rader@enq.ufrgs.br

Anderson Zang Borba

Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Rua Luiz Englert s/nº
90040-040, Porto Alegre-RS-Brasil
andersonz@enq.ufrgs.br

Ligia Damasceno Ferreira Marczak

Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Rua Luiz Englert s/nº
90040-040, Porto Alegre-RS-Brasil
ligia@enq.ufrgs.br

Talita Furlanetto Mendes

Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Rua Luiz Englert s/nº
90040-040, Porto Alegre-RS-Brasil
talita@enq.ufrgs.br

Argimiro Resende Secchi

Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Rua Luiz Englert s/nº
90040-040, Porto Alegre-RS-Brasil
arge@enq.ufrgs.br

Resumo. Neste trabalho, busca-se a determinação numérico-experimental do coeficiente difusivo de transferência de calor na dessolventização do farelo de soja, correspondente à região de um dessolventizador-tostador (DT), onde o farelo recebe calor indireto do vapor d'água. Este coeficiente será utilizado em estudos futuros de modelagem matemática de um DT. O equipamento experimental usado consiste de um cilindro oco isolado lateralmente e preenchido com farelo de soja. O cilindro recebe calor através de sua base e troca calor por convecção na sua parte superior. Termopares posicionados no eixo central da amostra monitoram o perfil de temperatura axial ao longo do tempo. Os perfis experimentais são comparados com os perfis obtidos através de uma modelagem numérica bidimensional e, através de um ajuste de parâmetros, é obtido o coeficientes térmico difusivo do farelo de soja. Verificou-se que o modelo matemático proposto é adequado para os materiais estudados, farelo de soja em flocos seco e areia seca, pois os perfis obtidos pelo modelo apresentam concordância satisfatória quando comparados com os perfis obtidos experimentalmente.

Palavras chave: farelo de soja, dessolventização, coeficientes difusivos de transferência de calor

1. Introdução

Os grãos de soja estão entre as principais matérias-primas processadas no mundo para obtenção de óleos vegetais e sua produção vem acompanhada da geração de farelo, que é rico em proteína, sendo destinado, principalmente, à produção de rações para animais. A tecnologia utilizada no processamento está sob contínua investigação, tanto para melhorar a qualidade dos produtos, como para reduzir os custos de produção. Em uma planta de extração com solvente, a unidade de dessolventização do farelo é responsável por grande parte do consumo de vapor, de eletricidade e de solvente e representa uma parte importante dos custos de investimento. O equipamento mais usado para a dessolventização do farelo de soja é o dessolventizador-tostador vertical (DT) cujo desempenho é responsável pela produção de farelo com boas qualidades nutricionais, isto é, com baixos teores de uréase e de inibidor da tripsina e uma

alta solubilidade protéica. Um DT se constitui basicamente de duas seções, uma onde a remoção do solvente ocorre em decorrência de transferência de calor por contato indireto e outra onde o vapor d'água está em contato direto com o farelo.

A fim de se modelar um DT é necessário que se conheçam os coeficientes globais de transferência de calor entre o farelo de soja e o vapor que aquece os pratos. Neste contexto, situa-se o objetivo deste trabalho de determinar experimentalmente a condutividade térmica do farelo de soja.

O processo de secagem de materiais granulares tem sido extensivamente estudado e existem modelos clássicos que levam em conta o transporte simultâneo de calor e massa (Luikov, 1968; Mujumdar, 1995). As equações governantes destes modelos também são usadas na modelagem da remoção de outros líquidos, como solventes. Nestas equações, a condutividade térmica do material é um parâmetro que necessita ser conhecido e é específico para cada tipo e granulometria do material empregado.

A dessolventização do farelo de soja continua sendo alvo de pesquisas, acrescentado-se aos motivos econômicos e de qualidades os fatores ambientais. Busca-se, então, desenvolver equipamentos que dessolventizem e tostem o farelo de forma eficiente, reduzindo o teor residual de hexano no farelo tostado, mantendo sua qualidade e reduzindo os consumos de energia e vapor ao mesmo tempo. Muitas destas pesquisas, como a de Kemper (2000), tratam de estudos em planta-piloto, onde se introduzem modificações nos equipamentos e variam-se as condições de operação para avaliar sua influência no produto final.

Na revisão da literatura, não foram encontradas referências contendo valores de condutividade térmica de farelo de soja em flocos. Foram efetuados experimentos de dessolventização em leito fixo, nesta primeira etapa do trabalho considerando o farelo seco, monitorando-se a temperatura axial ao longo do tempo. Os resultados obtidos experimentalmente foram utilizados em um modelo matemático que descreve o processo de transferência de calor, obtendo-se o valor da difusividade térmica via estimação de parâmetros.

2. Metodologia experimental

A Fig. (1) apresenta, esquematicamente, o sistema de dessolventização de farelo de soja em flocos, sobre o qual há a abertura da calha do sistema de ventilação (sucção). O cilindro oco representado nesta figura, confeccionado em aço, tem diâmetro interno de 0,083 m, diâmetro externo de 0,087 m e altura igual a 0,093 m e é revestido externamente com manta cerâmica. A amostra de material, à temperatura ambiente, era transferida para o cilindro metálico, à mesma temperatura e o conjunto era colocado sobre uma chapa de aquecimento usando-se pasta térmica entre a base do cilindro e a placa. A posição dos termopares, tipo J, era ajustada para medir a temperatura no eixo longitudinal central nos seguintes pontos: a 1,4 cm (termopar nº 1), a 4,9 cm (termopar nº 2), e a 8,30 cm (termopar nº 3) da base do cilindro. Na parte inferior do cilindro metálico foi colocado um termopar para monitorar a temperatura neste ponto; estes valores de temperatura variavam com o tempo e foram ajustados por um polinômio a fim de fornecer a variação real da temperatura na base. Media-se, sucessivamente, a temperatura de cada termopar, através da voltagem correspondente, em diversos tempos de experimento, até atingir o estado estacionário.

No início do experimento, eram medidas a temperatura e a pressão ambiente e era ligado o exaustor. Foram realizados experimentos com dois meios porosos diferentes, cujas propriedades são apresentadas na Tabela (1).

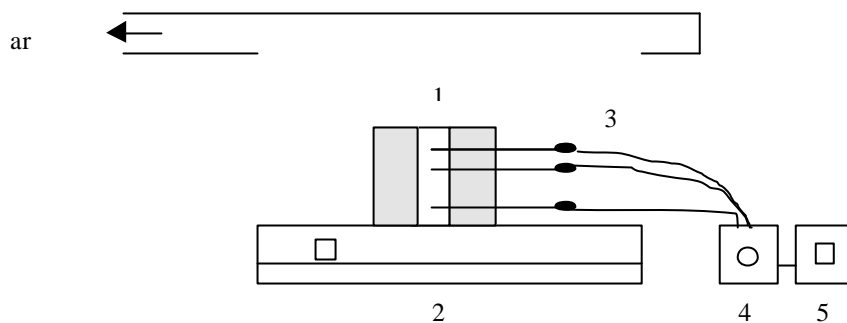


Figura 1. Representação esquemática do equipamento (1- cilindro oco isolado, 2 - chapa de aquecimento elétrico, 3 - termopares, 4 - chave seletora, 5 - medidor de voltagem).

Tabela 1. Propriedades das amostras utilizadas nos experimentos.

Material	Calor específico (kJ.kg ⁻¹ °C ⁻¹)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)
Farelo de soja seco	1,275	390
Areia seca	0,800	1515

3. Formulação matemática

O processo de transferência de calor por condução bidimensional em estado transiente que ocorre no meio em estudo é governado pela equação da energia escrita em coordenadas cilíndricas:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial T}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right] \quad R \in (0, R_C), z \in (0, L), t > 0 \quad (1)$$

onde T é a temperatura, t é o tempo, α é a difusividade térmica, R é a coordenada radial, Z é a coordenada axial, R_C é o raio externo do cilindro e L é altura do cilindro. Nesta equação foi assumido propriedades termofísicas constantes e simetria na direção θ . Vale salientar que a modelagem matemática leva em conta a condução de calor através da parede do cilindro metálico e, desta forma, o problema torna-se bidimensional.

Baseando-se na representação esquemática do sistema mostrada na Fig. (1), a seguir são mostradas as condições de contorno utilizadas.

Em $Z = 0$, ou seja, na base do cilindro, tem-se a especificação de uma temperatura variável com o tempo; na realidade, a temperatura especificada pela chapa de aquecimento não se manteve constante e foi necessário que se determinasse seu valor, variável com o tempo. Isto foi feito, medindo-se a temperatura por um termopar posicionado em um chanfro na base do cilindro. A variação de temperatura foi então aproximada considerando um polinômio de terceiro grau em relação ao tempo na forma da equação abaixo:

$$T|_{z=0} = T_{f\text{chapa}} + (T_{o\text{chapa}} - T_{f\text{chapa}}) \exp(-t(c + t(b + t \cdot a))) - d \quad (2)$$

onde as constantes a , b , c e d (do polinômio de ajuste) variaram de acordo com os dados utilizados para cada estimativa, $T_{o\text{chapa}}$ e $T_{f\text{chapa}}$ são as temperaturas inicial e final da chapa de aquecimento, respectivamente (variáveis para cada experimento).

Em $Z = L$ especificou-se uma troca de calor convectiva com o ar atmosférico e, assim, as seguintes equações são válidas:

$$-k \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=L} = h[T(Z=L) - T_{\text{ambiente}}] \quad R \in [0, R_i], t > 0 \quad (3a)$$

$$-k_m \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=L} = h[T(Z=L) - T_{\text{ambiente}}] \quad R \in (R_i, R_C], t > 0 \quad (3b)$$

onde k é a condutividade térmica do meio poroso e k_m é a condutividade térmica do cilindro, T_{ambiente} é a temperatura do ar, h é o coeficiente de troca térmica convectiva e R_i é o raio interno do cilindro. Conforme será discutido mais adiante, este parâmetro também foi estimado com base nos dados experimentais.

Para a direção radial, tem-se simetria em $R = 0$ e isolamento térmico na posição correspondente à posição $R = R_C$, ou seja:

$$\frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{R=0} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{R=R_C} = 0 \quad Z \in (0, L), t > 0 \quad (4)$$

Na interface entre a parede metálica lateral e o meio poroso adotaram-se as seguintes condições de continuidade da temperatura e do fluxo de calor, ou seja,

$$T \Big|_{R=R_i^+} = T \Big|_{R=R_i^-} \quad Z \in (0, L), t > 0 \quad (5a)$$

$$-k_m \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{R=R_i^+} = -k \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{R=R_i^-} \quad Z \in (0, L), t > 0 \quad (5b)$$

A condição inicial é dada por:

$$T|_{t=0} = T_{\text{ambiente}} \quad Z \in [0, L], R \in [0, R_C] \quad (6)$$

A fim de se aumentar a sensibilidade na variável de resposta temperatura durante a estimação dos parâmetros, foi necessário que se fizesse uma adimensionalização do modelo matemático. Para tanto, as seguintes variáveis adimensionais foram utilizadas:

$$T^* = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (7)$$

$$R^* = \frac{R}{R_C} \quad (8)$$

$$Z^* = \frac{Z}{L} \quad (9)$$

e

$$Bi = \frac{hL}{k} \quad (\text{número de Biot}) \quad (10)$$

onde $T_{\min} = 293,15K$ e $T_{\max} = 370K$.

O tempo não sofreu adimensionalização pois seria necessário utilizar o número de Fourier, que contém na sua definição um dos parâmetros a ser estimado tornando o intervalo de tempo variável na etapa de estimação.

4. Metodologia numérica

O problema de estimação de parâmetros busca determinar os valores para os parâmetros desconhecidos de modo a minimizar o desvio quadrático (ponderado ou não) entre as previsões do modelo matemático e os dados experimentais.

A estimação de parâmetros foi realizada utilizando-se o simulador gPROMS (General Process Modeling System), o qual faz uso de uma formulação de máxima verossimilhança, ou seja:

$$\text{Min}_{\alpha, \text{Biot}} \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^n \frac{(T_{i,j}^{\text{predição}} - T_{i,j}^{\text{experimental}})^2}{\sigma_j^2} \quad (11)$$

onde σ_j^2 é a variância das medidas de temperatura do termopar j e $T_{i,j}$ é a temperatura do termopar j no instante de tempo i (predita e experimental). Maiores detalhes desta clássica formulação podem ser encontrados em Beck e Arnold (1977).

O método de discretização da equação diferencial parcial utilizado foi o BFDM (Backward Finite Difference Method) de segunda ordem sobre uma malha uniforme de 50 intervalos na direção axial e o OCFEM (Orthogonal Collocation on Finite Elements Method) de terceira ordem sobre cinco elementos finitos na direção radial para o domínio interno ao cilindro (material que se deseja estimar os coeficientes difusivos) e de três elementos finitos para o domínio do cilindro (casca cilíndrica).

O procedimento utilizado foi o seguinte: primeiro fixava-se o valor da difusividade térmica do material em estudo (valor aproximado pela literatura) e estimava-se o número de Biot em estado estacionário. Este valor foi utilizado como estimativa inicial, juntamente com o valor da difusividade usado anteriormente, para se efetuar simultaneamente a estimação em estado transiente da propriedade difusividade térmica e do número de Biot.

5. Resultados e discussão

A fim de validar a metodologia de estimação do coeficiente difusivo para o farelo de soja, realizaram-se experimentos utilizando inicialmente areia seca. As Figs. (2) e (3) mostram os ajustes realizados para a temperatura da base e os seus coeficientes de correlação da função polinomial para a areia e para o farelo de soja, respectivamente.

Inicialmente, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para a areia. As Fig. (4), (5) e (6) mostram as temperaturas experimentais e as temperaturas preditas pelo modelo em função do tempo para os termopares 1, 2 e 3, respectivamente. A análise destas figuras permite observar que, para a areia, obteve-se uma excelente concordância entre os perfis experimentais e aqueles preditos pelo modelo.

Os gráficos das Figs. (7), (8) e (9) mostram as temperaturas experimentais em função das temperaturas preditas, para a areia, incluindo um ajuste linear e o respectivo coeficiente de correlação R^2 , para os termopares 1, 2 e 3, respectivamente. Novamente é possível observar que todos os casos apresentaram um coeficiente de correlação igual ou superior a 0,99, indicando que o ajuste foi feito com precisão satisfatória.

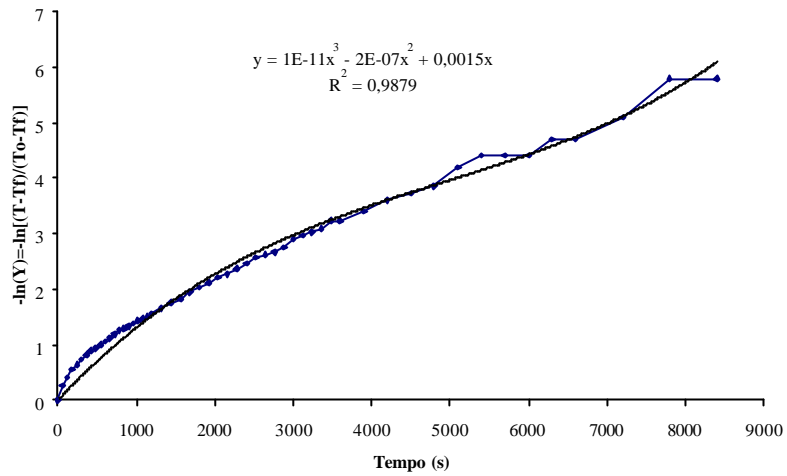


Figura 2. Ajuste para a temperatura da base para a areia seca.

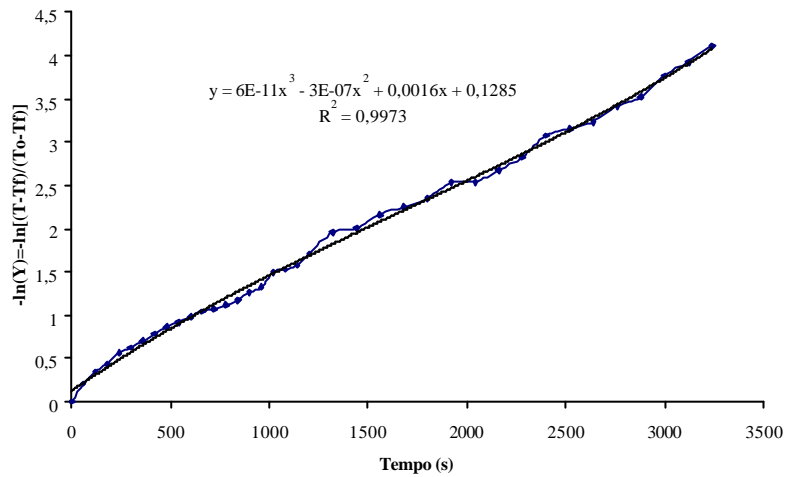


Figura 3. Ajuste para a temperatura da base para o farelo de soja.

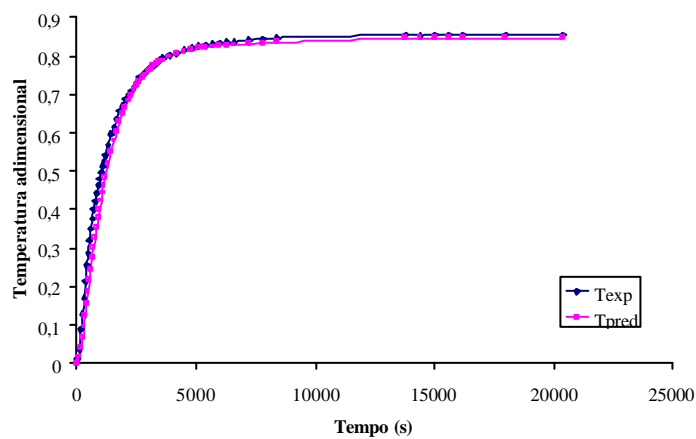


Figura 4. Temperaturas experimentais e previstas versus tempo para a areia. Termopar nº 1.

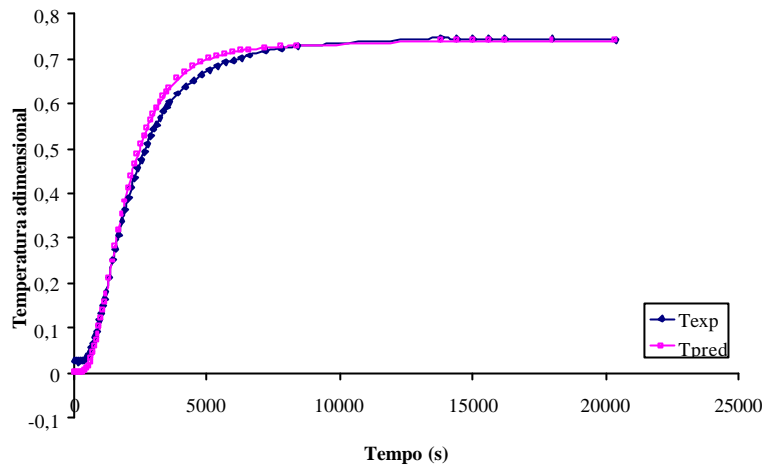


Figura 5. Temperaturas experimentais e preditas versus tempo para a areia. Termopar n° 2.

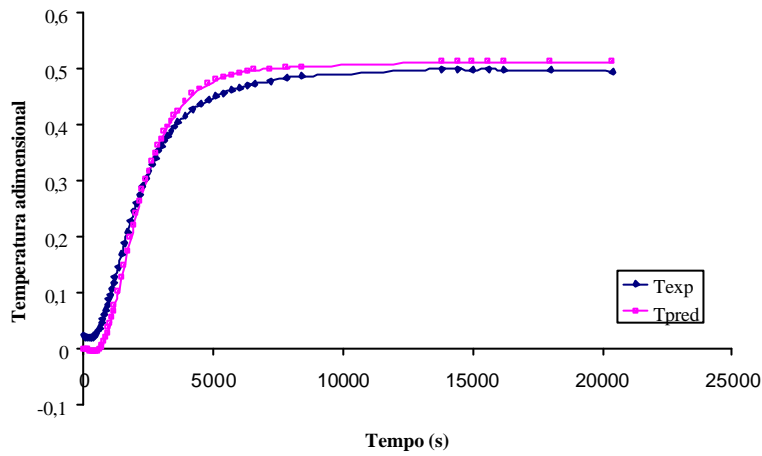


Figura 6. Temperaturas experimentais e preditas versus tempo para a areia. Termopar n° 3.

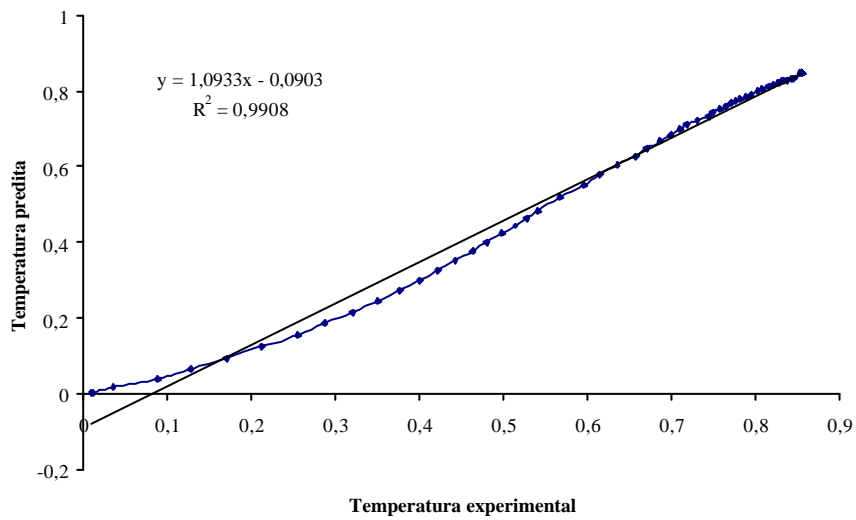


Figura 7. Temperaturas experimentais versus temperaturas preditas para a areia. Termopar n° 1.

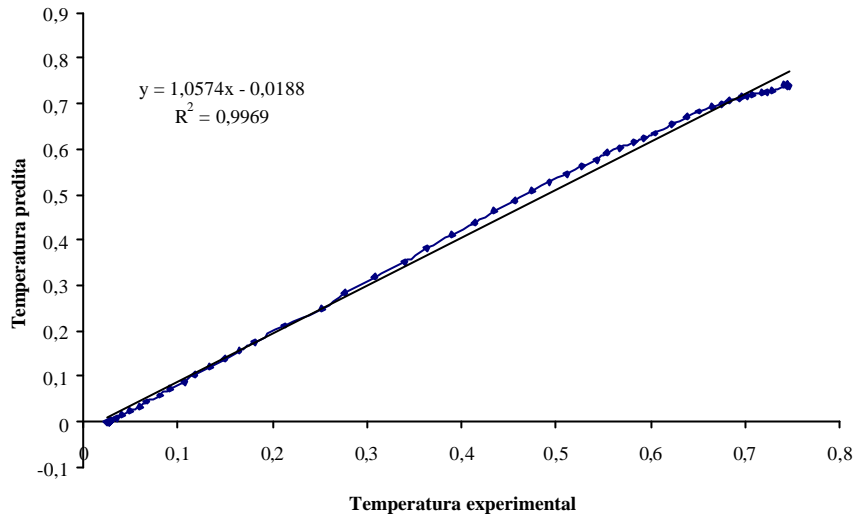


Figura 8. Temperaturas experimentais versus temperaturas preditas para a areia. Termopar n° 2.

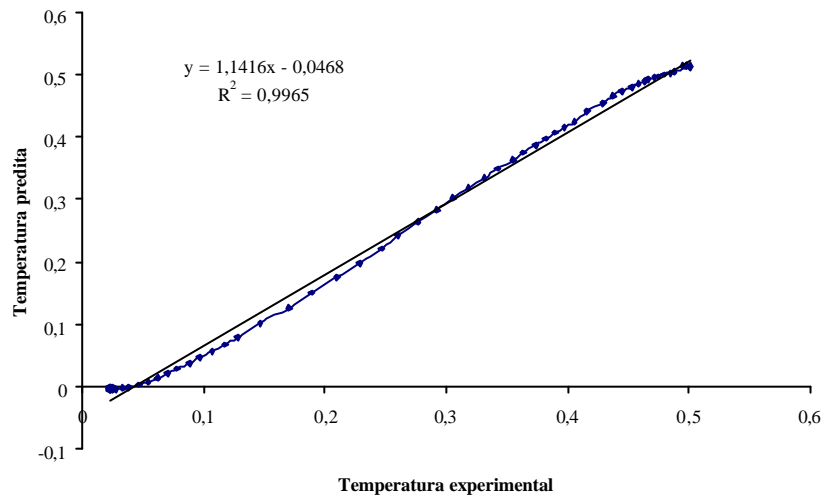


Figura 9. Temperaturas experimentais versus temperaturas preditas para a areia. Termopar n° 3.

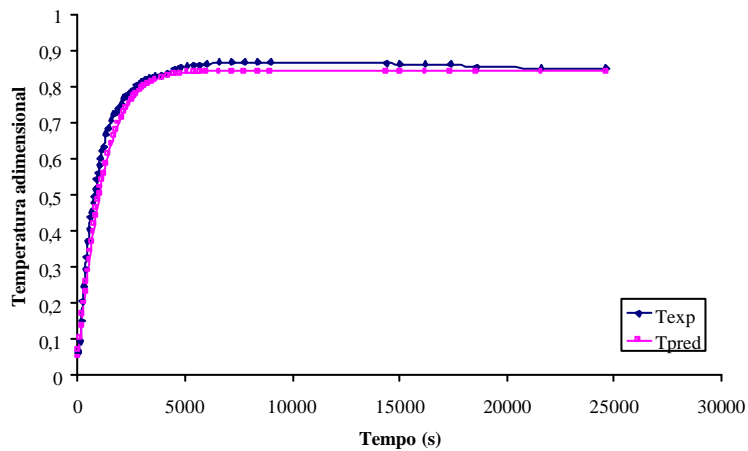


Figura 10. Temperaturas experimentais e preditas versus tempo para o farelo de soja. Termopar n° 1.

A seguir, foi feita a estimação para determinar o valor da condutividade térmica do farelo de soja seco, objeto do presente trabalho. Os gráficos das Figs. (10), (11) e (12) mostram as temperaturas experimentais e as temperaturas preditas pelo modelo para o farelo de soja em flocos em função do tempo para os termopares 1, 2 e 3, respectivamente. Pode-se observar novamente a excelente concordância entre os perfis experimentais e aqueles preditos pelo modelo.

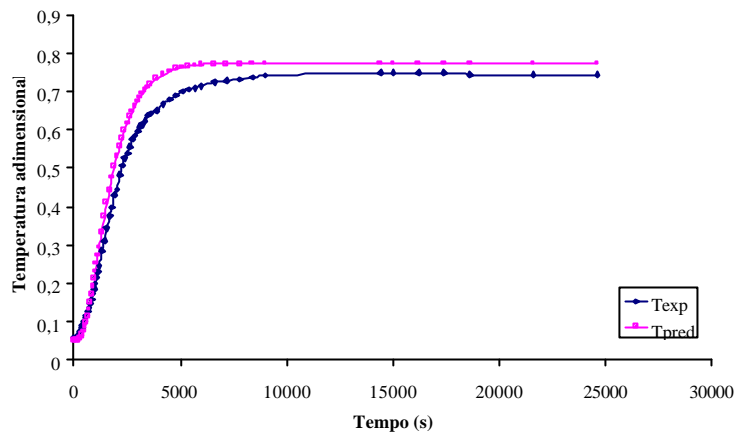


Figura 11. Temperaturas experimentais e previstas versus tempo para o farelo de soja. Termopar nº 2.

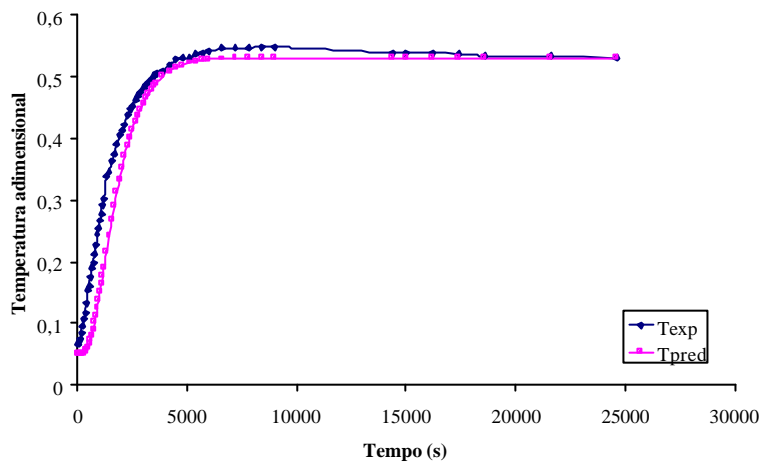


Figura 12. Temperaturas experimentais e previstas versus tempo para o farelo de soja. Termopar nº 3.

As Figuras (13), (14) e (15) mostram as temperaturas experimentais em função das temperaturas previstas, para o farelo de soja em flocos, incluindo um ajuste linear e o respectivo coeficiente de correlação R^2 , para os termopares 1, 2 e 3, respectivamente. Observa-se que todos os casos apresentaram um coeficiente de correlação igual ou superior a 0,97.

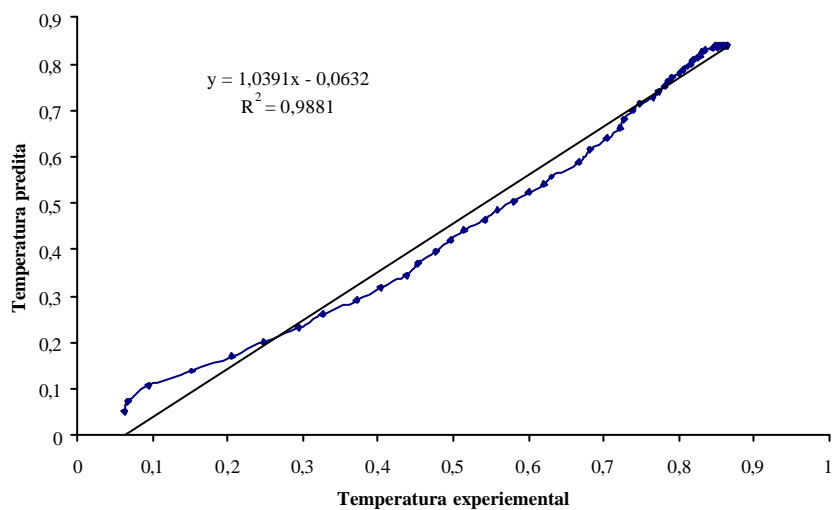


Figura 13. Temperaturas experimentais versus temperaturas previstas para farelo de soja. Termopar nº 1.

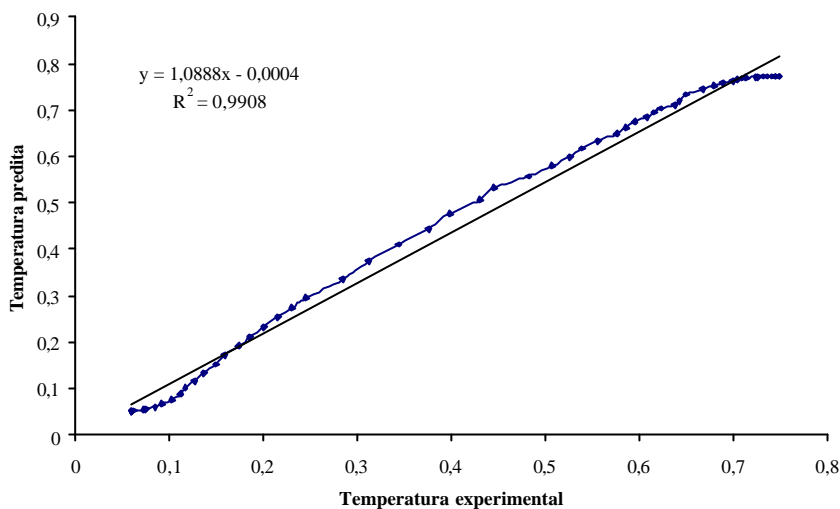


Figura 14. Temperaturas experimentais versus temperaturas preditas para farelo de soja. Termopar nº 2.

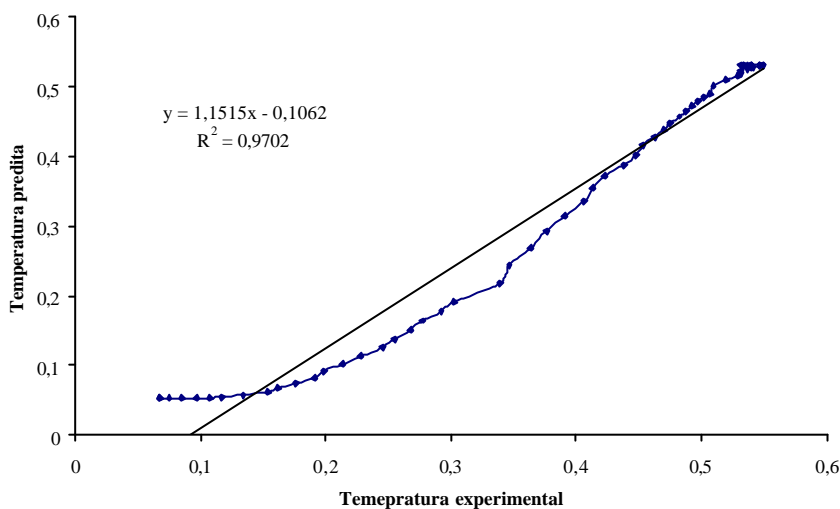


Figura 15. Temperaturas experimentais versus temperaturas preditas para farelo de soja. Termopar nº 3.

O valor obtido via estimação de parâmetros para a condutividade térmica da areia foi de $0,50 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Este valor é bastante próximo dos valores encontrados na literatura para a areia seca (Bejan, 1993). O coeficiente de troca térmica convectivo estimado foi da ordem de $16 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

A estimação de parâmetros para o farelo de soja em flocos seco conduziu a um valor de condutividade térmica igual a $0,34 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Para esta estimação, o coeficiente de troca térmica convectivo ficou próximo a $18 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

Os dados da estimação de parâmetros de difusividade térmica e número de Biot encontram-se na Tabela (2), onde verifica-se uma baixa correlação entre estes dois parâmetros.

Tabela 2. Dados da estimação de parâmetros

Material	$\alpha.10^7 \text{ (m}^2.\text{s}^{-1}\text{)}$	$\sigma_{\alpha}.10^7 \text{ (m}^2.\text{s}^{-1}\text{)}$	Bi	σ_{Bi}	Coefficiente de correlação
Farelo de soja seco	6,82	1,43	4,80	0,75	-0,78
Areia seca	4,12	0,08	3,00	0,08	-0,021

6. Conclusão

O presente trabalho teve por objetivo estimar a condutividade térmica do farelo de soja seco em flocos. Este valor é um parâmetro que necessita ser conhecido para estudos futuros para a modelagem do equipamento utilizado na dessolventização do farelo de soja extraído com solvente. Na literatura pesquisada não foram encontrados valores para esta propriedade térmica para o farelo de soja.

A estimação da condutividade térmica foi feita a partir de dados experimentais obtidos através de um processo de condução de calor. O modelo matemático utilizado está baseado na equação da energia escrita em coordenadas

cilíndricas bidimensionais. A estimação dos parâmetros foi feita utilizando a ferramenta de modelagem, simulação e estimação gPROMS. A fim de validar o metodologia proposta, foi estimado o valor da condutividade térmica de uma amostra de areia seca obtendo-se um valor bastante próximo dos valores encontrados na literatura.

A estimação da condutividade térmica para o farelo de soja foi realizada com precisão satisfatória e forneceu um valor de $0,34 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul) e da CAPES.

8. Referências

- Beck, J.V. e Arnold, K.J., (1977), *Parameter Estimation in Engineering and Science*, John Wiley & Sons, N.Y.
 Bejan, A., (1993), *Heat Transfer*, John Wiley & Sons, N.Y.
 Kemper, T. G. , 2000, "Innovaciones en la desolventización de harina. Aceites y Grasas, (12), 534-538.
 Luikov, A.V., (1968), *Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies. Pergamon Oxford*.
 Mujumdar, A.S., (1995), *Handbook of Industrial Drying*, 2.^a Ed., Marcel Dekker Inc. N.Y.

AN EXPERIMENTAL DETERMINATION OF DIFFUSIVE HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF SOYBEAN MEAL THROUGH PARAMETER ESTIMATION

Arlindo Soares Räder

Chemical Engineering Graduate Program - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
 Rua Luiz Englert s/nº
 90040-040, Porto Alegre-RS-Brasil
rader@enq.ufrgs.br

Anderson Zang Borba

Chemical Engineering Department - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
 Rua Luiz Englert s/nº
 90040-040, Porto Alegre-RS-Brasil
andersonz@enq.ufrgs.br

Ligia Damasceno Ferreira Marczak

Chemical Engineering Department - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
 Rua Luiz Englert s/nº
 90040-040, Porto Alegre-RS-Brasil
ligia@enq.ufrgs.br

Talita Furlanetto Mendes

Chemical Engineering Department - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
 Rua Luiz Englert s/nº
 90040-040, Porto Alegre-RS-Brasil
talita@enq.ufrgs.br

Argimiro Resende Secchi

Chemical Engineering Department - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
 Rua Luiz Englert s/nº
 90040-040, Porto Alegre-RS-Brasil
arge@enq.ufrgs.br

Abstract. *In this work, it is performed a numeric-experimental determination of diffusive heat transfer coefficient of soybean meal flakes. This coefficient will be used on future studies for mathematical modeling of a desolventizing-toaster. The experimental apparatus used is an hollow cylinder laterally insulated and filled with the sample. The cylinder is placed over a heating plate and changes heat by conduction through its base and by convection on the opposite face. Thermocouples placed on the central axis of the sample are used to measure the temperature axial profile throughout the time. The experimental profiles were compared with those obtained through two-dimensional numeric simulation and the diffusive heat transfer was obtained through parametric estimation. It was verified that the used mathematical model was adequate to describe the process, and the simulation were satisfactory well performed.*

Keywords. *soybean meal, desolventizing ,diffusive heat transfer coefficients.*