

**ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE GRÃOS DE
SOJA EM LEITO FIXO****Graziela Brusch Brinques**

Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Rua Luiz Englert s/nº
90040-040, Porto Alegre-RS-Brasil
grazibb@bol.com.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

Keiko Wada

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

Isabel Cristina Tessaro

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

Resumo. *O presente trabalho tem por objetivo modelar experimental e teoricamente o processo de secagem de grãos de soja em leito fixo. A motivação deste trabalho está no fato de que a literatura não apresenta valores de difusividade mássica efetiva para a soja, contrariamente ao que ocorre para outras oleaginosas, por exemplo, o arroz. Foram realizados experimentos onde mediu-se a variação de massa de um leito de soja em função do tempo para diferentes temperaturas do ar de secagem. Os valores experimentais foram utilizados para determinar teoricamente a difusividade mássica efetiva da água através do grão a partir da equação do perfil radial de umidade. Os resultados mostraram que a difusividade mássica é uma função dependente do teor de umidade e são propostos valores de difusividade mássica médios.*

Palavras chave: *secagem de grãos, grãos de soja, difusividade mássica efetiva, transferência de massa.*

1. Introdução

A secagem de grãos é uma operação unitária de grande interesse para os setores industrial e agrícola e a otimização deste processo, tanto do ponto de vista de redução de custos de produção quanto na melhoria da qualidade do produto, requer um estudo aprofundado dos fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem durante este processo.

Os materiais de origem vegetal, como é o caso de grãos de soja, retêm a umidade como parte integrante da estrutura do sólido. Nestas substâncias, o movimento de migração da umidade durante o processo de secagem é lento e na sua maior parte é controlado pela difusão do líquido através do sólido. Os teores de umidade no equilíbrio são, em geral, elevados, o que implica que uma quantidade significativa de umidade é retida no sólido ficando intimamente ligada ao mesmo. As camadas superficiais das partículas tendem a secar mais rapidamente que o seu interior, formando, muitas vezes, uma camada relativamente impermeável que impede o prosseguimento da migração de umidade do interior do grão para a sua superfície. A fim de se modelar este processo de migração de umidade é necessário que se conheça a difusividade mássica da água através do grão de soja e este parâmetro somente pode ser obtido experimentalmente.

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). Nas equações governantes destes modelos, a difusividade mássica da água através do grão é um parâmetro que necessita ser conhecido e é específico para cada tipo de material empregado. Em função de sua importância tecnológica, a secagem de grãos ainda hoje continua sendo alvo de pesquisas, sendo que na literatura existem poucos dados referentes a valores de difusividade mássica em grãos, especialmente para a soja. Hussain et al.(1973) compararam modelos matemáticos para a transferência de massa e para a transferência de calor e de massa simultânea e o modelo resolvido foi utilizado para

predizer características de secagem de arroz. Ece e Cihan (1993) obtiveram valores de difusividade mássica em arroz resolvendo analiticamente a equação da difusão de massa para estado transiente baseada na segunda Lei de Fick, considerando a geometria dos mesmos cilindros finitos. Em outro estudo, Cihan e Ece (2001) observaram que a influência do tempo de repouso na taxa de secagem grãos de arroz reflete no aumento no coeficiente de difusão. Doytcheva et al. (1998) estudaram a transferência de massa de um grão em leito fixo de partículas esféricas inertes, observando que a taxa de transferência de massa é bastante dependente da estrutura local do leito a redor de partículas de formas irregulares. Zecchi et al.(2001), através de resolução de um modelo semi-empírico obtiveram valores para o coeficiente de difusão de grãos de arroz considerando que este parâmetro era variável com o tempo.

Conforme comentado anteriormente, na revisão feita para o presente trabalho, não há referências em relação a valores de difusividade mássica para grãos de soja. Neste contexto, situa-se o objetivo e a motivação deste trabalho de modelar o processo de secagem visando determinar os parâmetros difusivos na secagem de soja. Foram efetuados experimentos de secagem em leito fixo e a determinação da taxa de secagem foi feita monitorando-se a temperatura do ar de secagem e a variação de peso da amostra durante os experimentos. Nos experimentos realizados foram variadas a umidade residual dos grãos e a temperatura do ar na entrada do secador. Os resultados obtidos experimentalmente foram utilizados em um modelo matemático que descreve o processo de migração de umidade através do interior do grão, obtendo-se os valores de difusividade mássica efetiva.

2. Formulação matemática

Na modelagem matemática, os grãos de soja são representados como esferas homogêneas de raio R com volume igual ao volume real do grão. Todas as variáveis estão expressas em unidade do Sistema Internacional. A equação que governa a migração de umidade no interior do sólido é escrita em coordenadas esféricas assumindo-se que o fluxo por difusão ocorre somente na direção radial:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 N_{A,r}) \right] = 0 \quad (1)$$

onde C_A é a concentração mássica de água na matriz sólida (kg de água.m⁻³); t é o tempo, r é a variável radial e $N_{A,r}$ é o fluxo de massa de água na direção radial.

A 1ª Lei de Fick da difusão aplicada para o problema da transferência de massa na direção radial através de uma matriz sólida (onde se despreza a contribuição da parcela convectiva) é representada pela equação:

$$N_{A,r} = -D_{\text{eff}} \frac{dC_A}{dr} \quad (2)$$

onde D_{eff} é a difusividade mássica efetiva da água através do grão de soja.

Assumindo a difusividade efetiva independente do teor de umidade, portanto independente da variável r , a substituição da Eq. (2) na Eq. (1) fornece:

$$D_{\text{eff}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) = r^2 \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (3)$$

A condição inicial e as condições de contorno são expressas por:

$$\begin{aligned} \text{em } t = 0 \quad \text{para } r < R \quad C_A &= C_{A0} \\ \text{em } r = R \quad \text{para } t > 0 \quad C_A &= C_{A1} \\ \text{em } r = 0 \quad \text{para } t > 0 \quad \left. \frac{\partial C_A}{\partial r} \right|_{r=0} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

onde C_{A0} é a concentração mássica inicial no grão. Na superfície do sólido, assume-se o estabelecimento instantâneo de equilíbrio gás-sólido, sendo C_{A1} esta concentração de equilíbrio.

A solução da Eq. (3) com suas condições de contorno e condição inicial, representadas na Eq. (4), fornece a seguinte solução particular:

$$\frac{C_A - C_{A1}}{C_{A0} - C_{A1}} = \frac{2R}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{nr} \text{sen} \frac{n\pi r}{R} \exp \left[\frac{-n^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{R^2} \right] \quad (5)$$

A integração da Eq. (5) ao longo do volume do grão determina a massa de água contida no grão para um dado tempo:

$$\frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{\text{eff}} \cdot t}{R^2}\right) \right] - Y = 0 \quad (6)$$

$$\text{onde } Y = \left[\frac{\overline{M_A} - V \cdot C_{A1}}{(C_{A0} - C_{A1}) \cdot V} \right] \quad (7)$$

Na Eq. (7) V é o volume da esfera e $\overline{M_A}$ é a massa de água no grão. A variável Y da Eq. (6), definida na Eq. (7), representa a razão entre a massa de água removível existente no grão para um dado tempo t e a massa de água total removível no tempo inicial. O termo massa de água removível refere-se à quantidade de água que efetivamente pode ser removida do grão, ou seja, a massa de água acima da massa de água de equilíbrio. Vale notar que todos os parâmetros que compõe a variável Y são determinadas experimentalmente; esta variável será utilizada mais adiante na análise dos resultados. Utilizando os dados experimentais, a Eq. (6) foi resolvida para a determinação da difusividade mássica efetiva para cada ponto experimental, sendo que este cálculo numérico foi realizado utilizando o aplicativo Matlab.

2. Metodologia experimental

A Fig. (1) representa esquematicamente o sistema de secagem de grãos de soja em leito fixo. O termo leito fixo está sendo utilizado neste texto em contraste a leito fluidizado, embora o leito do presente trabalho seja um leito de camada fina, onde assume-se que não há gradientes de concentração e temperatura.

Os grãos de soja foram distribuídos em um leito de 5 cm de altura em um tubo de acrílico de 9,61 cm de diâmetro. O leito foi posicionado sobre uma tela distribuidora, através da qual era insuflado uma corrente de ar. Esta corrente de ar, proveniente do ventilador, foi aquecida por resistências elétricas e a medida da temperatura do ar de secagem foi realizada acoplando-se um termopar do tipo K na entrada do leito. Este termopar foi ligado a um controlador digital de temperatura que mantinha a temperatura do ar em uma determinada faixa de operação. A vazão do ar foi ajustada com a utilização de um rotâmetro.

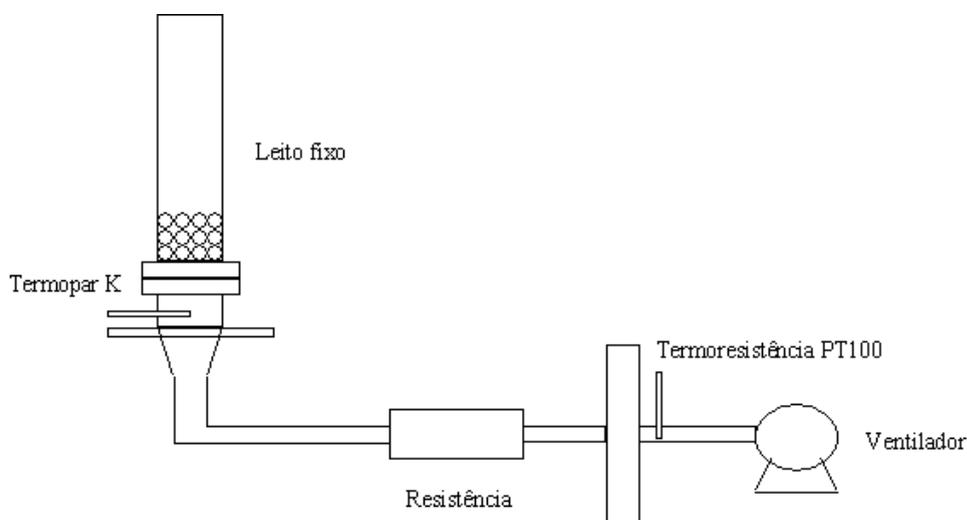


Figura 1. Representação esquemática do sistema de secagem.

Nos experimentos realizados, as temperaturas de entrada do ar no leito foram mantidas em três faixas diferentes: de a fim de se estudar a influência deste parâmetro no desempenho da secagem. Para todos os experimentos realizados a vazão no rotâmetro foi mantida em aproximadamente $190 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. O diâmetro médio dos grãos de soja utilizados nos experimentos foi determinado medindo-se, com um paquímetro, o diâmetro individual de uma amostra representativa de grãos. O valor final do diâmetro médio utilizado nos cálculos teóricos foi de 0,7 cm.

A evolução do processo de secagem dos grãos de soja foi monitorada através da diferença de peso do leito medida em balança digital com precisão de 0,01 g ao longo do tempo.

4. Resultados e Discussão

Os experimentos foram realizados para diferentes amostras de um mesmo lote de soja. Cada amostra será denominada no texto como Amostra A, Amostra B e assim por diante. Para cada amostra determinou-se a umidade

inicial (base úmida) θ_i , ou seja, o valor percentual da razão entre a massa de água e a massa total da amostra. Esta percentagem de água representa a percentagem de água removível da amostra. Este valor foi obtido por análise gravimétrica secando os grãos em estufa a 105 °C até massa constante. A concentração de equilíbrio C_{A1} foi calculada utilizando o valor da massa da amostra obtida a partir da extrapolação das curvas de variação de massa versus tempo até um valor constante de massa. Conforme comentado anteriormente, a temperatura de entrada do ar de secagem foi ajustada para três faixas distintas. A Tabela 1 apresenta os valores θ_i , C_{A1} e as faixas de temperatura para cada um das 9 amostras utilizadas nos testes.

Tabela 1. Valores do teor de umidade inicial, da concentração de equilíbrio e da faixa de temperatura para as 9 amostras.

Amostra	θ_i (%)	C_{A1} (kg/m ³)	Faixa de temperatura
A	12,3	53,6	60-65 °C
B	12,3	54,6	60-65 °C
C	11,8	24,6	60-65 °C
D	11,8	23,4	60-65 °C
E	11,8	24,4	60-65 °C
F	11,1	17,6	60-65 °C
G	11,1	21,4	60-65 °C
H	11,1	42,0	40-55 °C
I	11,1	25,8	50-55 °C

Por razões de tempo, apenas dois experimentos foram realizados com temperaturas fora da faixa de 60 a 65 °C. Conforme será discutido mais a adiante, os resultados obtidos para estas duas faixas de temperatura necessitariam ser confirmados por repetições dos experimentos.

A Fig. (2) apresenta a variação da massa da amostra em função do tempo para 5 experimentos, correspondentes às amostras A, C, F, H e I. Optou-se por plotar os resultados de apenas 5 amostras para que não houvesse acúmulo de curvas no gráfico.

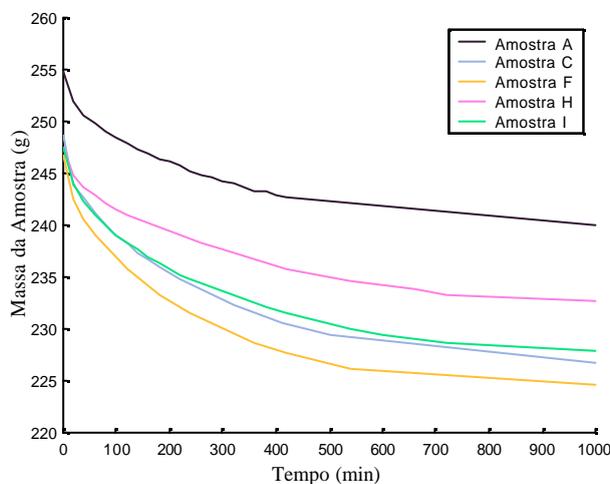


Figura 2. Variação de massa em função do tempo para diferentes amostras.

A análise da Fig. (2) revela a influência das condições de equilíbrio na taxa de secagem, uma vez que os valores dos patamares de massa constante são diferentes para cada experimento. Estes valores dependem essencialmente das condições do ar de secagem (temperatura e teor de umidade). A fim de eliminar este efeito, traçaram-se, em função do tempo, as curvas que representam a variação da razão entre a massa de água removível existente no grão para um dado tempo t e a massa de água total removível no tempo inicial, variável Y , adimensional, definida anteriormente. Este gráfico está mostrado na Fig. (3) e é possível observar agora que, diferentemente da tendência de comportamento da curvas da Fig. (2), todas as curvas têm um decaimento com o tempo praticamente igual, independentemente da amostra considerada. Este fato mostra que a evolução do processo de secagem, analisado sob o ponto de vista da adimensionalização da variação de massa em relação ao conteúdo de umidade residual, é praticamente o mesmo para cada amostra.

Uma vez apresentados os resultados dos experimentos que foram realizados, passa-se agora à análise dos resultados obtidos para a estimação da propriedade difusividade mássica efetiva, objeto principal do presente trabalho. No texto

que se segue, por questões de simplicidade, a variável difusividade mássica efetiva será referenciada apenas como difusividade.

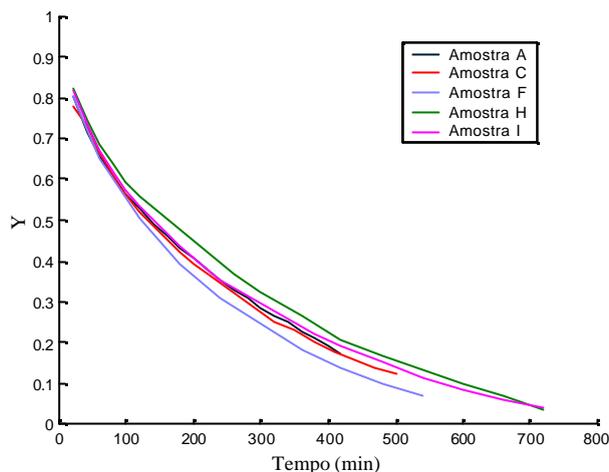


Figura 3. Variação da razão Y em função do tempo para diferentes amostras.

O procedimento adotado para a determinação da difusividade consiste em, a partir dos dados experimentais, determinar o valor da variável Y para cada um dos 9 experimentos realizados. A partir da utilização da Eq. (6), utilizando para este cálculo o aplicativo Matlab, determinou-se o valor da difusividade para cada ponto experimental. Ou seja, para cada curva mostrada na Fig. (3), foi obtido um conjunto de valores de difusividade e para cada conjunto determinou-se uma difusividade mássica efetiva média ponderada no intervalo de tempo. Os valores médios estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de difusividade mássica efetiva médios ponderados no tempo para as 9 amostras.

Amostra	$D_{eff} \times 10^{11}$ $m^2 s^{-1}$
A	5,4
B	6,2
C	5,8
D	6,0
E	6,6
F	7,1
G	7,9
H	5,9
I	6,1

A fim de se comparar os resultados experimentais com aqueles obtidos com os valores da difusividade determinada pela estimativa, ou seja, obtidos a partir da curva de secagem experimental, simulou-se o comportamento do processo de secagem utilizando os valores de D_{eff} da Tabela 2. A comparação entre os resultados obtidos para a variação da massa de água no grão em função do tempo para estas simulações e os valores experimentais estão mostrados nas Fig. (4.) e (5), para as amostras, A e H, respectivamente. Vale notar que nestes gráficos a variável plotada no eixo das ordenadas é dimensional e não deve ser confundida com a variável adimensional Y. A análise destas figuras revela que o modelo matemático de secagem utilizado, que considera D_{eff} constante, não representa adequadamente o processo, uma vez que a curva experimental e a curva da simulação não são coincidentes. Vale observar que estas duas amostras foram escolhidas aleatoriamente pois esta diferença entre as duas curvas ocorrem em todas as amostras.

Para melhor visualizar o efeito da concentração de equilíbrio sobre os valores da difusividade, agruparam-se as amostras A e B, as amostras C, D e E e as amostras F e G. Os valores apresentados na Tabela 3 de concentração de equilíbrio e de difusividade de cada um dos grupos são médias aritméticas dos valores individuais.

Tabela 3. Valores concentração de equilíbrio e de difusividade mássica efetiva médios para os agrupamentos.

Amostra	C_{A1} $kg m^{-3}$	$D_{eff} \times 10^{11}$ $M^2 s^{-1}$
A e B	54,2	5,8
C, D e E	24,1	6,1
F e G	19,5	7,4

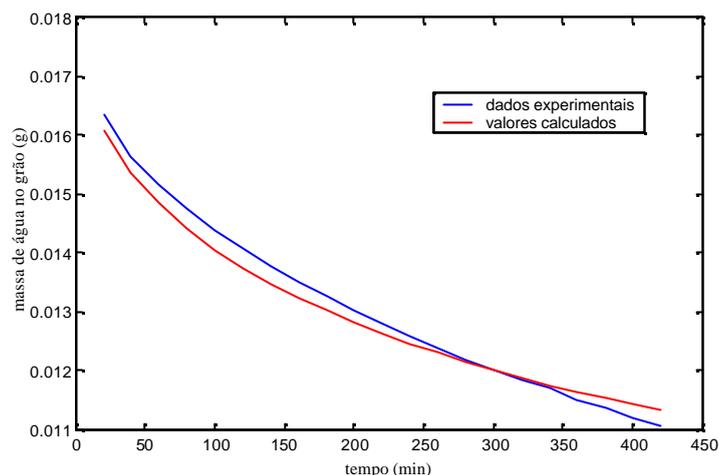


Figura 4. Variação de massa de água no grão em função do tempo, experimental e simulada, para amostra A.

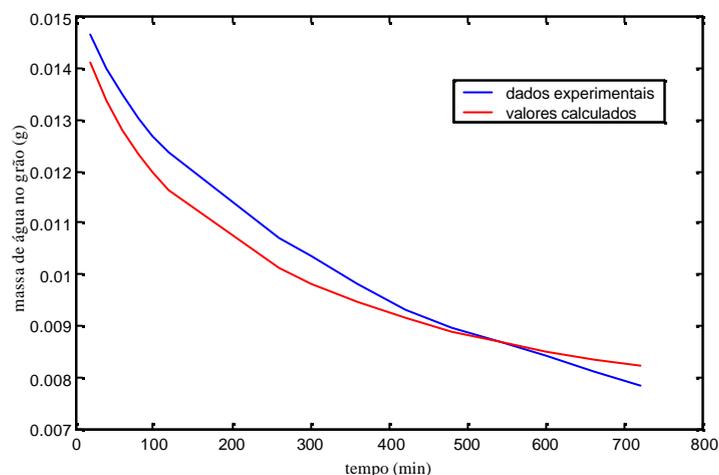


Figura 5. Variação de massa de água no grão em função do tempo, experimental e simulada, para amostra H.

Pela análise da Tabela (3) pode-se observar que à medida que a concentração de equilíbrio diminui, a difusividade aumenta. Este efeito é confirmado pela variação de difusividade ao longo da secagem, cujos valores aumentam à medida que a concentração de água no grão diminui. É importante lembrar que a concentração de equilíbrio está diretamente associada ao teor de umidade do grão, uma vez que quanto maior a concentração de equilíbrio maior será a média de concentração de água no grão.

A fim de analisar o efeito da temperatura do ar de secagem sobre o processo de secagem, foram conduzidos experimentos com temperatura nas faixas de 40 a 45 °C, de 50 a 55 °C e de 60 a 65 °C. Os resultados desta análise estão mostrados na Tabela (4), onde foram utilizados os dados experimentais da amostra agrupada F e G e das amostras H e I. Estas amostras foram escolhidas para esta análise uma vez que todas elas apresentaram o mesmo teor de umidade inicial.

Tabela 4. Valores da difusividade médios em função da temperatura do ar de secagem.

Amostra	Faixa de Temperatura	$D_{eff} \times 10^{11}$ $m^2 s^{-1}$
H	40 a 45 °C	5,9
I	50 a 55 °C	6,1
F e G	60 a 65 °C	7,4

A análise dos resultados apresentados nesta tabela mostra que, para os casos investigados neste trabalho, a difusividade tem uma tendência a aumentar com o aumento de temperatura, conforme o esperado. Como dito anteriormente, por razões de tempo, foram feitos apenas dois experimentos com temperaturas fora da faixa de

60 a 65 °C. Assim sendo, os resultados obtidos para as outras duas faixas de temperatura necessitariam ser confirmados por repetições dos experimentos.

Com o objetivo de verificar o efeito da umidificação do grão de soja sobre o processo de secagem, foram conduzidos alguns experimentos utilizando-se amostras umidificadas para comparação com as amostras não umidificadas. Esta comparação é importante uma vez que, na prática, o tempo de colheita dos grãos é relativamente curto e, em muitas vezes, a secagem dos grãos ocorre sem que eles tenham perdido sua umidade original, ou seja, a secagem é feita com amostras totalmente umidificadas. Na Tabela (5) são apresentados os dados experimentais e os valores de difusividade obtidos com as amostras umidificadas.

Tabela 5. Valores do teor de umidade inicial, da concentração de equilíbrio e da faixa de temperatura para as 3 amostras umidificadas.

Amostra	θ_i (%)	C_{A1} (kg/m ³)	Faixa de temperatura	$D_{eff} \times 10^{11}$ m ² s ⁻¹
J	21,8	65,8	60-65 °C	6,1
K	20,2	32,8	60-65 °C	7,2
L	19,3	31,5	40-45 °C	5,9

As amostras umidificadas não foram objeto principal de análise devido ao número limitado de ensaios realizados. Contudo, um aspecto importante que foi observado deve ser salientado: como pode ser verificado na Fig. (6), que mostra o gráfico da variação da massa de água no grão em uma das amostras umidificadas em função do tempo, as curvas experimental e simulada se sobrepõem quase que totalmente, o que não ocorre com as amostras não umidificadas. Isto demonstra a adequação do modelo de difusão com D_{eff} constante para descrever o comportamento do processo de secagem de grãos umidificados. No entanto, os valores de difusividade não apresentam diferença significativa daqueles obtidos para os grãos não umidificados.

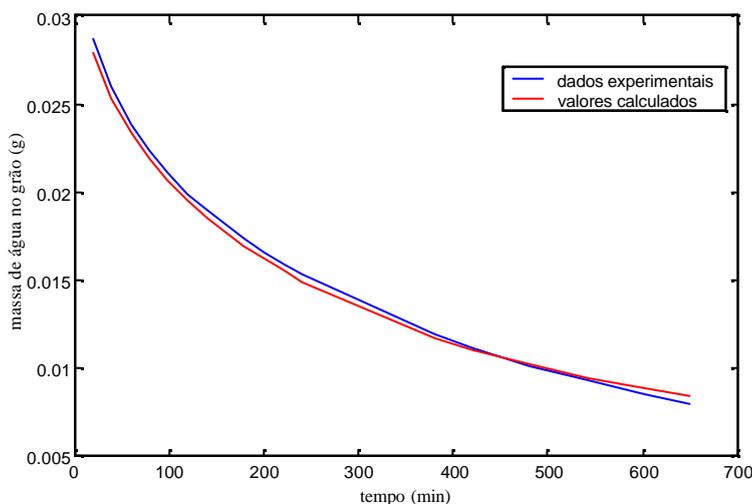


Figura 6. Variação de massa de água no grão em função do tempo para amostra L (umidificada).

5. Conclusões

No presente trabalho, foram realizados experimentos de secagem de grãos de soja em leito fixo avaliando-se a variação de massa da amostra ao longo do tempo, objetivando determinar valores de difusividade mássica efetiva para o processo de migração de umidade através dos grão. Valores desta propriedade para grãos de soja praticamente inexistem na literatura. Através dos dados experimentais e utilizando o modelo de difusão para difusividade constante, obteve-se valores médios de difusividade mássica efetiva para diferentes concentrações de equilíbrio e diferentes temperaturas do ar de secagem.

Conforme o esperado, as difusividades mássicas efetivas não são constantes ao longo do experimento, aumentando à medida que se reduz a concentração média de água no grão. Além disto observou-se que o aumento da temperatura do ar de secagem aumenta o valor da difusividade.

O comportamento da secagem de grãos umidificados difere do comportamento dos grãos não umidificados, uma vez que a difusividade é praticamente constante ao longo da secagem. No entanto, os valores de difusividade não apresentam diferença significativa daqueles obtidos para os grãos não umidificados.

6. Referências

- Cihan, A. and Ece, M.C., 2001, "Liquid Difusion Model for Intermittent Drying of Rough Rice", Journal of Food Engineering, Vol. 49, pp. 327-331.
- Doytcheva, B., Nikolova, A., Peev, G. and Todorova, D., 1998, "Mass Transfer from a Single Grain to a Fluid in an Inert Fixed Bed", Int. Comm. Heat Transfer, Vol. 25, N.º 3, pp. 399-405.
- Ece, M.C. and Cihan, A., 1993, "A liquid diffusion model for drying rough rice", American Society of Agriculture Engineers, Vol.36(3), pp. 837-840.
- Husain, A., Chen, C.S. and Clayton, J.T., 1973, "Simultaneous Heat and Mass Diffusin en Biological Materials. J. Agric. Engng. Res., 18, pp. 343-354.
- Mujumdar, A.S., 1995, "Handbook of Industrial Drying", 2.ª Ed., Marcel Dekker Inc. N.Y.
- Luikov, A.V., 1968, "Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies". Pergamon Oxford.
- Zecchi, B., Martínez, J.G. and Gerla, P., 2001, "A Diffussion Model with Variable Coefficients for Rough Rice Drying", Proceedings of ENPROMER 2001, Vol.III, pp. 1531-1536.

A THEORETICAL-AND EXPPERIMENTAL STUDY OF SOYBEAN DRYING IN A FIXED BED COLUMN

Graziela Brusch Brinques

Chemical Engineering Department - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
 Rua Luiz Englert s/nº
 90040-040, Porto Alegre-RS-Brasil
grazilbb@bol.com.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

Keiko Wada

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

Isabel Cristina. Tessaro

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

Abstract. *Experimental and theoretical modeling of the soybean drying process in a fixed bed column have been studied in this work. The motivation of this study is the lack of data for effective mass diffusivity for soybean in the literature, in contrast with datas for others oleaginous, such rice for example. Experiments were performed to measure the mass variation of a fixed bed of soybean as a function of time for several air drying temperatures. From the equation of the radial profile of moisture, the experimental data were used to determine theoretically the effective mass diffusivity of water through the grain. The results shown that the mass diffusivity is a function of moisture contents in the grain and values of mass diffusivity were proposed.*

Keywords: Grain drying, soybeans grains, effective mass difusivity, mass transfer.