

# DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE E DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO PARA FEIJÃO MACASSAR (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), VARIEDADE SEMPRE-VERDE, COM BASE NO COMPORTAMENTO DA SECAGEM

WILTON P. DA SILVA<sup>1</sup>, MÁRIO E. R. M. CAVALCANTI MATA<sup>2</sup>,  
CLEITON D. P. S. E SILVA<sup>3</sup>, MANOEL A. GUEDES<sup>4</sup>, ANTONIO G. B. LIMA<sup>5</sup>

**RESUMO:** Neste artigo, teve-se o objetivo de determinar curvas de secagem em camada fina para grãos de feijão macassar, variedade sempre-verde. Visou-se, também, à determinação da difusividade efetiva da água no interior do produto, bem como a energia de ativação. Para tal, foram utilizadas amostras com 150 g de feijão com teor inicial de água de 37% (bu), nas temperaturas de 40; 50 e 60 °C. A velocidade do ar do secador convectivo foi mantida em 1,0 m s<sup>-1</sup> e, durante todo o processo, os valores médios da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente foram, respectivamente, 29 °C e 58%. A difusividade efetiva da água no produto foi determinada, em cada temperatura, por meio da lei de Fick, pressupondo um modelo esférico para os grãos. Uma expressão para a difusividade efetiva da água em função da temperatura foi determinada por meio do ajuste da equação de Arrhenius aos dados obtidos. A análise dos resultados possibilita concluir que a equação de Page representa, de forma satisfatória, o processo de secagem em todas as condições estudadas. O modelo esférico estabelecido para os grãos é satisfatório, resultando em difusividade efetiva que variou de 7,13x10<sup>-11</sup> até 14,0x10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>, e em energia de ativação igual a 26,9 kJ mol<sup>-1</sup>. Foi observado que, para a temperatura do ar de secagem mantida em 60 °C, houve a formação de fissuras em quantidade significativa de grãos.

**PALAVRAS-CHAVE:** modelo de Page, segunda lei de Fick, teor de água, grãos esféricos.

## DETERMINATION OF DIFFUSIVITY AND ACTIVATION ENERGY FOR COWPEA GRAINS (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), ALWAYS-GREEN VARIETY, BASED ON ITS DRYING BEHAVIOR

**ABSTRACT:** In this paper it was determined the thin layer drying curves for cowpea grains, always-green variety. It was also determined the effective water diffusivity inside the product and its activation energy. For these purposes, 150 g samples of cowpea grains dried at temperatures of 40; 50 and 60 °C were used. The drying air velocity was maintained constantly at 1.0 m s<sup>-1</sup> during the drying process. The drying air temperature and relative humidity were 29 °C and 58%, respectively. The effective water diffusivity inside the product was determined, for each drying temperature, by using Fick's equation assuming a spherical shape for the grains. A mathematical expression for the effective water diffusivity inside the product as a function of temperature was determined by fitting Arrhenius's equation to the observed data. According to the analysis of the results, it is possible to conclude that the Page equation can be used to satisfactorily represent the cowpea grains drying process for the conditions of this research. The assumption of a spherical shape for the grains was satisfactory, resulting in a water effective diffusivity varying from 7.13x10<sup>-11</sup> to 14.00x10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> and activation energy equal to 26.9 kJ mol<sup>-1</sup>. It was also observed that for a drying air temperature of 60 °C a significant amount of grains presented fissures.

**KEYWORDS:** Page's model, Fick's second law, moisture content, spherical grains.

<sup>1</sup> Eng<sup>o</sup> Eletricista, Prof. Doutor, DF/CCT/UFCG, Campina Grande - PB, Fone: (0XX83) 3333.2962, wiltonps@uol.com.br

<sup>2</sup> Eng<sup>o</sup> Agrícola, Prof. Doutor, DEAg, UFCG, Campina Grande, PB.

<sup>3</sup> Eng<sup>o</sup> Eletrônico, Doutorando em Sistemas e Controle, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos - SP.

<sup>4</sup> Físico, Técnico de Nível Superior do Núcleo de Energia, Campina Grande - PB.

<sup>5</sup> Eng<sup>o</sup> Mecânico, Prof. Doutor, DEM, UFCG, Campina Grande - PB.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 26-2-2007

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 25-2-2008

## INTRODUÇÃO

Em vários estados brasileiros e em muitas outras partes do mundo, um percentual significativo da população consome feijão verde. Conforme observam FANG et al. (2003), a maior restrição ao consumo do produto é referente às perdas durante o armazenamento por infestação de pragas. Naturalmente, uma forma de minimizar o problema consiste em prévia secagem dos grãos que, posteriormente, podem ser reidratados, readquirindo características próximas das originais. Além disso, a secagem reduz substancialmente a massa e o volume do produto, minimizando custos com embalagem, transporte e armazenamento (OKOS et al., 1992; MUJUMDAR, 1995).

Alguns estudos sobre tecnologia de pós-colheita para feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), variedade sempre-verde, têm sido encontrados na literatura. CAVALCANTI MATA & DUARTE (2003) realizaram estudo teórico-experimental sobre a cinética de secagem em camada espessa de feijão macassar, levando em consideração o seu encolhimento.

OLIVEIRA et al. (2004) realizaram experimentos para determinar o teor de água de equilíbrio para feijão macassar em vários cenários de temperatura e umidade relativa do ar de secagem.

SILVA et al. (2005) utilizaram os dados de OLIVEIRA et al. (2004) para propor nova equação empírica para a determinação do teor de água de equilíbrio de feijão macassar.

DOYMAZ (2005) estudou a cinética de secagem em camada fina de feijão verde produzido na Turquia. Nos experimentos, o produto foi cortado em fatias para a posterior determinação de curvas de secagem. Em seu estudo, DOYMAZ (2005) determinou a difusividade efetiva de água nas fatias, consideradas como um plano infinito, às quais foi aplicado o modelo difusional, determinando, também, a energia de ativação.

Neste trabalho, os objetivos foram estudar o comportamento da secagem em camada fina de grãos de feijão macassar, variedade sempre-verde, determinar a difusividade efetiva de água no produto e também obter uma expressão que relaciona tal difusividade com a temperatura.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Secador e matéria-prima

Esta pesquisa foi realizada no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA), do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Campina Grande - PB. O secador convectivo utilizado, com fluxo vertical e bandeja removível, foi desenvolvido por professores e alunos do curso de pós-graduação em Engenharia Agrícola, sendo alguns de seus detalhes apresentados na Figura 1.



FIGURA 1. Secador convectivo utilizado no experimento. **Convective drier used in the experiment.**

A bandeja é feita em estrutura de madeira e tem área superficial útil quadrada, com pequena altura e dimensões internas de 0,15 x 0,15 x 0,05 m, perfazendo o volume de  $1,125 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ , sendo o fundo construído com tela de arame de aço, onde repousam os grãos.

A amostra de feijão macassar foi adquirida na feira central de Campina Grande - PB, em meados do mês de março de 2006, armazenada em sacos de plástico com porções de 150 g, que foram colocadas em geladeira comum durante um dia, até o momento da secagem.

Os procedimentos experimentais foram divididos em três etapas: 1) medições para a determinação do teor inicial de água do produto; 2) medições para a determinação do volume e raio médios dos grãos, e 3) medições para a obtenção das curvas de secagem.

Inicialmente, o teor de água de amostras do produto foi determinado, em triplicata, por meio do método-padrão da estufa (exposição por 24 h a  $105 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Posteriormente, os produtos resultantes da secagem, nas várias temperaturas, também foram colocados na estufa por 24 h, o que possibilitou não só medir a massa seca de cada amostra, como também recalculer o teor inicial de água.

O volume médio de um grão foi medido por meio da introdução de 47 grãos em uma proveta parcialmente preenchida com água, o que possibilitou determinar o raio médio da esfera equivalente a cada grão ( $r = 0,00394 \text{ m}$ ).

Em todas as curvas obtidas, a velocidade do ar de secagem foi medida com anemômetro analógico René Graf, e mantida em  $1 \text{ m s}^{-1}$ . A temperatura do ar, tanto ambiente quanto de secagem, foi medida com termômetro digital equipado com um termopar, utilizado como sensor. A umidade relativa do ar ambiente foi medida com higrômetro digital Pacer DH 100, enquanto as massas foram medidas com balança digital. Para a secagem, com ar a  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , a temperatura média do ar ambiente foi de  $29 \text{ }^\circ\text{C}$ , e a sua umidade relativa, em média, foi de 58%. Já para a secagem com ar a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , a temperatura média do ar ambiente foi de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , e a sua umidade relativa média foi de 58%. Por sua vez, para a secagem, com ar a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , a temperatura média do ar ambiente foi de  $29 \text{ }^\circ\text{C}$ , e a sua umidade relativa média foi de 57%. Nos três casos, amostras com grãos de feijão macassar, com massa inicial de 150 g, foram colocadas no secador; em determinados intervalos de tempo, tais amostras tiveram suas massas medidas.

Para a determinação dos teores de água ao longo do tempo, durante a secagem, foi utilizada a eq.(1) (BROOKER et al., 1992):

$$X_{bu} = \frac{m(t) - m_s}{m(t)} \quad (1)$$

em que,

$X_{bu}$  - teor de água em base úmida (bu);  
 $m(t)$  - massa da amostra de feijão no tempo t;  
 $m(t) - m_s$  - massa de água no produto no tempo t, e  
 $m_s$  - massa seca.

Por ser esperada boa adequação da equação de Page (PAGE, 1949) aos dados experimentais, essa foi a equação usada para a obtenção das curvas de secagem:

$$X = X_e + (X_i - X_e)e^{-Ct^D} \quad (2)$$

em que,

X - teor de água em um instante t;  
 $X_e$  - teor de água de equilíbrio do produto com o ar de secagem;  
 $X_i$  - teor inicial de água do produto, e  
C e D - parâmetros de ajuste.

A eq.(2) pode ser rearranjada para expressar a razão do teor de água:

$$RX = e^{-Ct^D} \quad (3)$$

em que,

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (4)$$

O teor de água de equilíbrio  $X_e$  foi determinado pela equação obtida por SILVA et al. (2005), devido ao fato de essa equação apresentar melhores indicadores de ajuste para dados de feijão macassar, variedade sempre-verde, que outras equações disponíveis na literatura. Tais dados foram disponibilizados por OLIVEIRA et al. (2004) e, para o referido produto, tal equação é escrita do seguinte modo:

$$X_e = \frac{e^{-0,007726T}}{\ln(1,0925 - 0,0008863\Phi + 1/\Phi)} \quad (5)$$

em que,

$\Phi$  - umidade relativa do ar de secagem, %, e

T - temperatura, °C.

Para a determinação da umidade relativa do ar de secagem, foi utilizado um gráfico psicrométrico.

A difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) da água no interior do produto foi determinada pressupondo o modelo em que cada grão foi considerado como uma esfera, com valores constantes para o volume e a massa específica dos grãos, bem como para a temperatura e para o teor de água em sua superfície. Para esse caso, a equação de difusão de massa em coordenadas esféricas, dada pela segunda lei de Fick, pode ser escrita do seguinte modo (BIRD et al., 1960; SILVA, 2004):

$$\frac{\partial X'}{\partial t} = D_{ef} \left( \frac{\partial^2 X'}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial X'}{\partial r} \right) \quad (6)$$

em que,

$X'$  - teor de água numa posição r em um instante t.

Para uma condição de contorno de primeira espécie, nas condições previamente assumidas, a eq.(6) tem solução analítica (CRANK, 1992), o que possibilita determinar o teor médio (X) de água nos grãos e, conseqüentemente, a razão do teor de água, por meio da expressão:

$$RX = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-n^2 At) \quad (7)$$

em que,

$$A = \frac{\pi^2}{r^2} D_{ef}, \quad (8)$$

sendo r o raio da esfera equivalente ao grão.

Uma vez obtidos os dados da cinética de secagem, a expressão dada pela eq.(7), com uma quantidade adequada de termos, pode ser ajustada a tais dados, o que possibilita determinar o parâmetro A e, conseqüentemente, a difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) por meio da eq.(8). Os dados obtidos para a difusividade efetiva em cada temperatura foram, então, usados para o ajuste da equação de Arrhenius (BROD et al., 2003):

$$D_{ef} = D_0 \exp\left[-E_a / (R(T + 273,15))\right] \quad (9)$$

em que,

$D_0$  - constante chamada de fator pré-exponencial, e

R - constante universal dos gases ideais.

Tal ajuste possibilita determinar a energia de ativação ( $E_a$ ). Todo o tratamento dos dados experimentais foi feito com o LAB Fit Curve Fitting Software® (SILVA et al., 2004). A tolerância para as regressões não-lineares, realizadas por mínimos quadrados (algoritmo de Levenberg-Marquardt), foi fixada em  $1 \times 10^{-6}$ , sendo a qualidade dos ajustes indicada por meio do coeficiente de determinação e do qui-quadrado reduzido. Detalhes sobre esses testes estatísticos podem ser obtidos em BEVINGTON & ROBINSON (1992); BUSSAB & MORETTIN (1995); TAYLOR (1997); SILVA & SILVA (1998) e em BARROS NETO et al. (2003).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ajustando-se a eq.(3) aos dados obtidos, podem-se obter as curvas de secagem que são mostradas nas Figuras 2(a), (b) e (c). Na Figura 2(d), apresentam-se, simultaneamente, as três funções ajustadas referentes às temperaturas de 40; 50 e 60 °C.

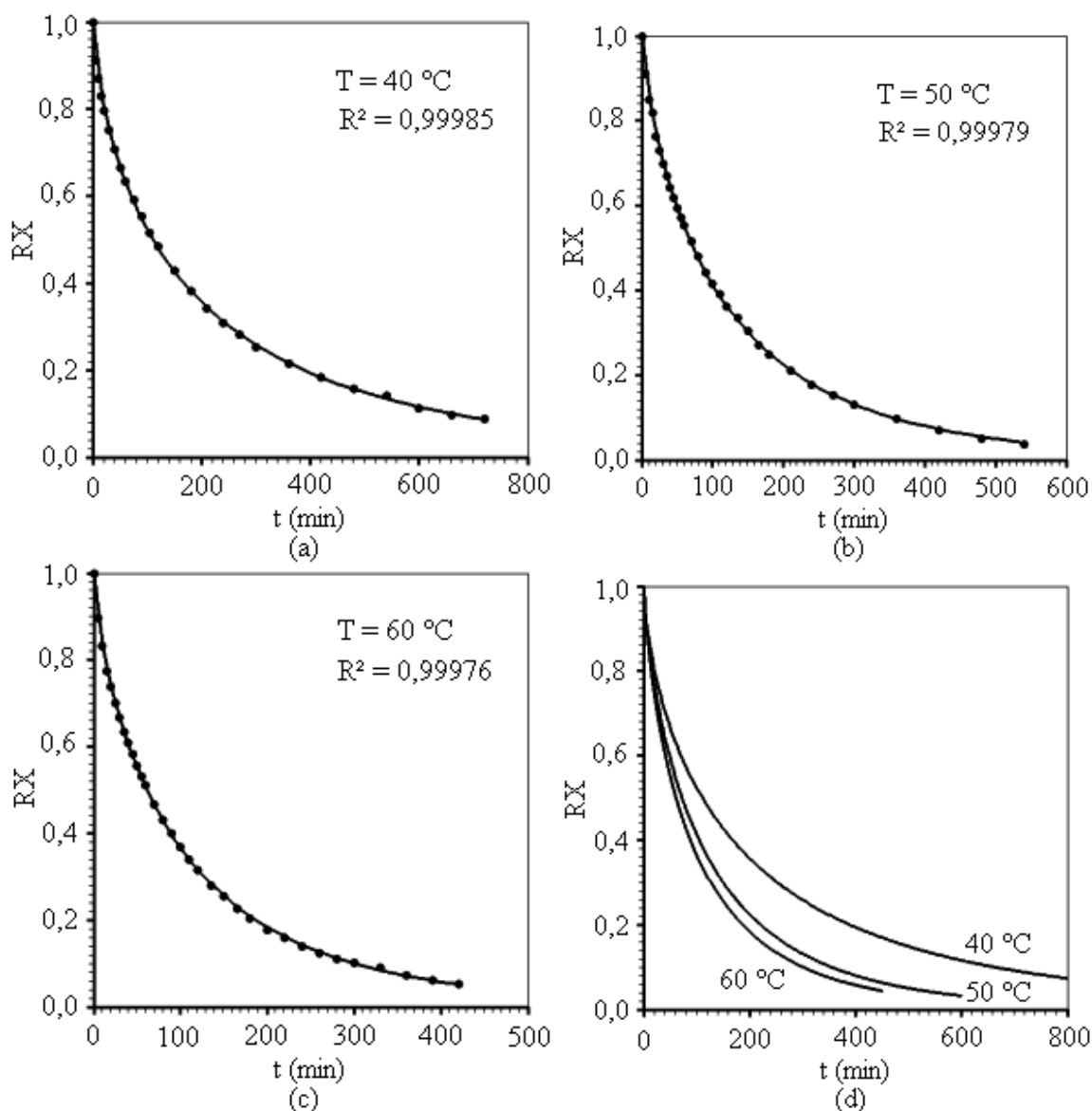


FIGURA 2. Modelos de Page: (a) razão do teor de água em função do tempo para  $T = 40$  °C; (b) razão do teor de água em função do tempo para  $T = 50$  °C; (c) razão do teor de água em função do tempo para  $T = 60$  °C; (d) Funções ajustadas (modelos de Page) para  $T = 40$ ; 50 e 60 °C. **Page model: (a) moisture content ratio in function of the time for  $T = 40$  °C; (b) moisture content ratio in function of the time for  $T = 50$  °C; (c) moisture content ratio in function of the time for  $T = 60$  °C; (d) fitted functions (Page models) for  $T = 40$ ; 50 and 60 °C.**

Devem ser observados os altos coeficientes de determinação obtidos para os três ajustes, como mostrado nos gráficos das Figuras 2 (a), (b) e (c), indicando a adequação do modelo de Page aos dados obtidos para as cinéticas de secagem.

As difusividades efetivas da água para as três temperaturas do ar de secagem podem ser determinadas pelo ajuste da solução analítica dada pela eq.(7), aos dados obtidos experimentalmente para a razão do teor de água. Uma vez determinado o valor do parâmetro A para cada temperatura, pode-se usar a eq.(8) para o cálculo da difusividade efetiva. Como a eq.(7) é dada por somatório de infinitos termos, podem-se realizar os ajustes para vários cenários, com os seguintes truncamentos: série com apenas um termo, com dois termos, etc., até uma série com oito termos. Obviamente, com essa limitação na quantidade de termos, as razões do teor de água para tempos próximos de zero não são descritas de forma satisfatória pela solução analítica truncada. Assim, os dois primeiros pontos de cada curva referente à cinética de secagem não foram considerados nesses ajustes. O procedimento descrito resulta na Tabela 1, dada a seguir. Essa tabela apresenta, ainda, nas duas últimas linhas, dois indicadores da qualidade dos ajustes da série com oito termos aos dados qui-quadrado reduzido ( $\chi^2_{red}$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

TABELA 1. Parâmetro A ( $\text{min}^{-1}$ ) da eq.(7) ajustada aos dados obtidos. **Parameter A ( $\text{min}^{-1}$ ) of the eq.(7) fitted to the obtained data.**

Número de Termos	40 °C	50 °C	60 °C
1	0,002418	0,003954	0,004941
2	0,002659	0,004334	0,005289
3	0,002705	0,004383	0,005331
4	0,002716	0,004389	0,005335
5	0,002720	0,004388	0,005335
6	0,002721	0,004388	0,005335
7	0,002721	0,004387	0,005334
8	0,002721	0,004387	0,005334
$\chi^2_{red}$ (8 termos)	$4,09610 \times 10^{-4}$	$1,29002 \times 10^{-3}$	$1,08866 \times 10^{-3}$
$R^2$ (8 termos)	0,9980466	0,9973414	0,9970898

Pela Tabela 1, constata-se que os coeficientes de determinação são relativamente altos para as três temperaturas e que, nos três casos, os valores de A convergem para oito termos da série, levando-se em conta uma tolerância de  $1 \times 10^{-5}$ . Dessa forma, pode-se considerar que oito termos sejam suficientes para descrever os dados experimentais, nas três temperaturas, por meio do modelo difusional dado pela eq.(7). Nas Figuras 3; 4 e 5, pode-se observar a razoável adequação do modelo difusional com oito termos aos dados experimentais.

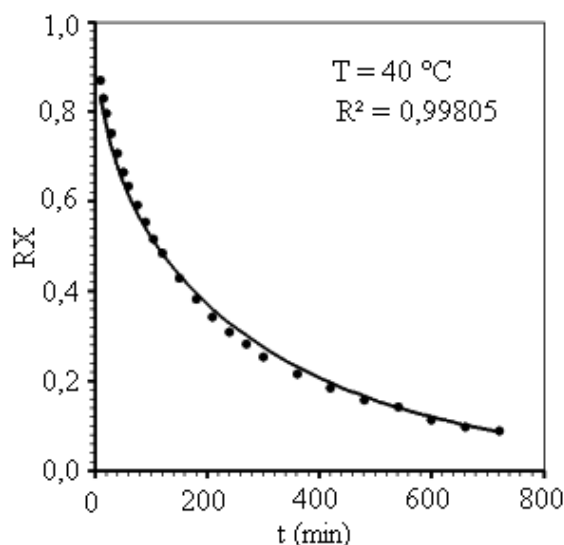


FIGURA 3. Modelo difusional para T = 40 °C. **Diffusive model for T = 40 °C.**

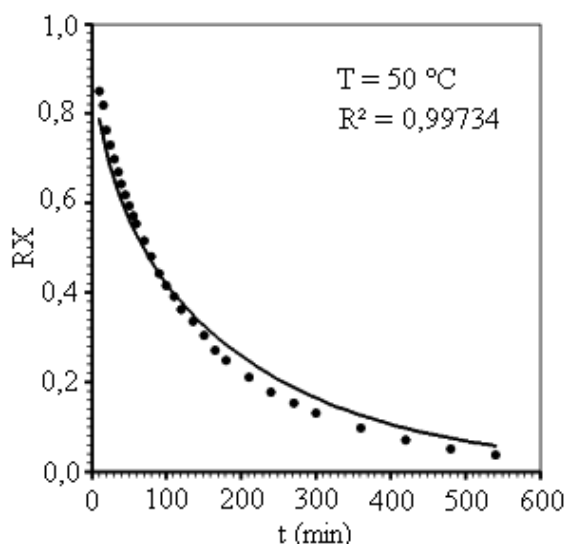


FIGURA 4. Modelo difusional para T = 50 °C. **Diffusive model for T = 50 °C.**

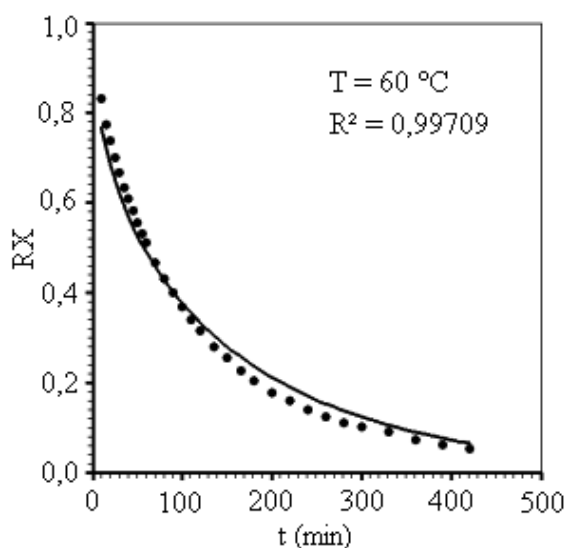


FIGURA 5. Modelo difusional para T = 60 °C. **Diffusive model for T = 60 °C.**

Substituindo o valor de cada parâmetro A obtido com oito termos (cujo valor é indicado na Tabela 1) na eq.(8), pode-se construir a Tabela 2 para a difusividade efetiva, com a devida adequação dos resultados para o sistema internacional de unidades.

TABELA 2. Difusividade efetiva em função da temperatura. **Effective diffusivity in function of the temperature.**

T(°C)	40	50	60
D <sub>ef</sub> (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	7,13 x 10 <sup>-11</sup>	11,5 x 10 <sup>-11</sup>	14,0 x 10 <sup>-11</sup>

Pela Tabela 2, conclui-se que os valores obtidos neste artigo para a difusividade efetiva de feijão macassar são compatíveis com a faixa de valores encontrados na literatura para produtos biológicos entre 10<sup>-11</sup> e 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> (MUDAMBA et al., 1996). Por outro lado, mesmo para a limitada quantidade de dados disponível para este trabalho, pode-se fazer o ajuste da equação de Arrhenius [eq.(9)] aos dados da Tabela 2, o que possibilita escrever:

$$D_{ef} = 2,33 \times 10^{-6} \exp \left[ -\frac{3231}{T + 273,15} \right] \tag{10}$$

Comparando a eq.(9) com o resultado dado pela eq.(10), pode-se determinar a energia de ativação para as condições estudadas:  $26,9 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Esse valor é coerente com valores encontrados na literatura para secagem de produtos biológicos, conforme pode ser observado na Tabela 3.

TABELA 3. Energia de ativação para alguns produtos biológicos. **Activation energy for some biological products.**

Produto	Energia de Ativação ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )	Referência
Trigo	26,6	GASTÓN et al. (2003)
Soja	28,8	DOYMAZ (2005)
Cenoura	28,4	DOYMAZ (2005)
Ervilhas verdes	28,4	CORRÊA et al. (2006)
Café cereja	22,6	CORRÊA et al. (2006)
Feijão Macassar	26,9	Presente trabalho

## CONCLUSÕES

A Equação de Page descreve, de forma satisfatória, o processo de secagem para todas as temperaturas examinadas.

A difusividade efetiva da água no produto aumenta com o aumento da temperatura do ar de secagem.

O modelo esférico estabelecido para cada grão é satisfatório, resultando em uma difusividade efetiva que variou de  $7,13 \times 10^{-11}$  até  $14,0 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , e em uma energia de ativação de  $26,9 \text{ kJ mol}^{-1}$ .

Para a temperatura de  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , foram observadas fissuras em quantidade expressiva de grãos, ocorridas durante o processo de secagem, o que pode comprometer a qualidade do produto.

## REFERÊNCIAS

- BARROS NETO, B.; SCARMÍNIO, I.S.; BRUNS, R.E. *Como fazer experimentos*. Campinas: UNICAMP, 2003. 401 p.
- BEVINGTON, P.R.; ROBINSON, D.K. *Data reduction and error analysis for the physical sciences*. 2<sup>nd</sup> ed. Boston: WCB/McGraw-Hill, 1992. 328 p.
- BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. *Transport phenomena*. New York: John Wiley, 1960. 779 p.
- BROD, F.P.R.; PARK, K.J.; OLIVEIRA, R.A. Modelos matemáticos para representar a secagem de raiz de chicória. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.23, n.2, p.354-63, 2003.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. *Drying and storage of grains and oilseeds*. Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.
- BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P. *A estatística básica*. São Paulo: Atual Editora, 1995. 322 p.
- CAVALCANTI MATA, E.R.M.; DUARTE, M.E.M. Drying simulation theory of the cowpea considering grains shrinkage. Drying simulation theory of the cowpea considering the grains shrinkage. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.5, n.2, p.179-85, 2003.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D.M. Drying characteristics and kinetics of coffee berry. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.8, n.1, p.1-10, 2006.
- CRANK, J. *The mathematics of diffusion*. Oxford: Clarendon Press, 1992. 414 p.
- DOYMAZ, I. Drying behaviour of green beans. *Journal of food Engineering*, London, v.69, n.1, p.161-5, 2005.



- FANG, C.; CHINNAN, M.S.; THAI, C. Finite element modeling of heat and mass transfer during steaming of cowpea seeds. *Journal of Food Science*, Oxford, v.68 n.5, p.1.702-12, 2003.
- GASTÓN, A.L.; ABALONE, R.M.; GINER, S.A.; BRUCE, D.M. Geometry effect on water diffusivity estimation in printa-isla verde and broom wheat cultivars. *Latin American Applied Research*, Bahía Blanca, v.33, n.1, p.327-31, 2003.
- MUDAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, London, v.29, n.1, p.75-97, 1996.
- MUJUMDAR, A.S. *Handbook of industrial drying*. New York: Marcel Dekker, 1995. 730 p.
- OKOS, M. R.; NARSIMHAN, G.; SINGH, R.K.; WITNAUER, A.C. Food dehydration. In: HELDMAN, D.R.; LUND, D.B. Lund (Ed.). *Handbook of food Engineering*. New York: Marcel Dekker, 1992. p.437-562.
- OLIVEIRA, J.R.; CAVALCANTI MATA, E.R.M.; DUARTE, M.E.M. Isotermas de dessecção de grãos de feijão macassar verde (*vigna unguiculada* (L.) Walpers), variedade sempre-verde. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.6, n.1, p.61-70, 2004.
- PAGE, G. E. *Factors influencing the maximum of air drying shelled corn in thin layer*. 1949. Thesis (M. Sc.) - Purdue University, Indiana, 1949.
- SILVA, V.A. *Secagem osmoconvectiva da acerola*. 2004. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.
- SILVA, W.P.; MATA, M.E.R.M.C.; PRECKER, J.W.; SILVA, C.M.D.P.S.; SILVA, C.D.P.S.; SILVA, D.D.P.S.; LIMA, A.G.B. Uma equação empírica para determinação de teor de água de equilíbrio para grãos. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.7, n.1, p.71-82, 2005.
- SILVA, W.P.; SILVA, C.M.D.P.S. *Tratamento de dados experimentais*. 2.ed. João Pessoa: UFPB Editora Universitária, 1998. 197 p.
- SILVA, W.P.; SILVA, C.M.D.P.S.; CAVALCANTI, C.G.B.; SILVA, D.P.S.; SOARES, I.B.; OLIVEIRA, J.A.S.O.; SILVA, C.D.P.S. "LAB Fit Ajuste de Curvas": um *software* em português para tratamento de dados experimentais. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v.26, n.4, p.419-29, 2004.
- TAYLOR, J.R. *An introduction to error analysis*. 2.ed. Sausalito, California: University Science Books, 1997. 327 p.