



XXI Congresso Brasileiro
de Engenharia Química

Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro



XVI Encontro Brasileiro sobre o
Ensino de Engenharia Química
Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro

AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE PROCESSOS DE SECAGEM DA JABUTICABA *IN NATURA* COM O USO DE INDICADORES DE DESEMPENHO

D.S.C. SOARES¹, J.T.S. SANTOS¹, L.A.L.C. LIMA¹, T.P. NUNES¹, A. C. S. D. CHAVES² e A.M. de OLIVEIRA Jr.^{1,3}

¹ Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Tecnologia de Alimentos

² Embrapa Agroindústria de Alimentos, Rio de Janeiro

³ Universidade Federal de Sergipe, Pós Graduação em Engenharia Química

E-mail para contato: amartins.junior@gmail.com

RESUMO – A jabuticaba possui alto potencial de comercialização. No entanto, um dos problemas que agravam sua comercialização é a alta perecibilidade, com isto é necessária a aplicação de tecnologias para prolongar seu tempo de vida útil. A secagem é uma tecnologia que influencia na qualidade e preservação do produto final por meio da redução da umidade no produto. Objetivou-se estudar cinética da secagem da jabuticaba *in natura* em diferentes temperaturas, através de modelos matemáticos de secagem e avaliá-los por meio de indicadores de desempenho. As jabuticabas foram submetidas à secagem em estufa a 50 e 60°C. Verificou-se que o coeficiente de difusividade da jabuticaba a 50°C ($9,23 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$) foi inferior do que a 60°C ($1,56 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$). Além disso, o modelo que se ajustou melhor a cinética de secagem da jabuticaba a 50°C e 60°C foi o modelo de Midilli, no entanto o modelo de Page obteve resultados semelhantes com a estimativa de somente dois parâmetros.

1. INTRODUÇÃO

A jabuticabeira (*Myrciaria cauliflora* Berg) é uma árvore frutífera pertencente à família Myrtaceae, de ocorrência natural em grande parte do Brasil, a qual possui um alto potencial de comercialização. O consumo da jabuticaba é muito frequente, essa fruta é usada na preparação de vários produtos processados de maior valor agregado, tais como doces, compotas, bebidas e licores fermentados. É de suma importância a fabricação destes produtos, pois estes utilizam partes do fruto que seriam descartados, como no caso de compotas de jabuticaba, a qual utiliza as cascas e sementes, que em conjunto representam 50% do fruto (Lima *et al.*, 2008).

No Brasil, parte da produção destes frutos é voltada para o consumo destinado a populações locais, no entanto, um dos problemas que agravam sua comercialização é a alta perecibilidade. A maioria dos frutos é desperdiçada durante a colheita por causa da alta produção por árvore, curta vida

PROMOÇÃO

REALIZAÇÃO

ORGANIZAÇÃO





XXI Congresso Brasileiro
de Engenharia Química

Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro



XVI Encontro Brasileiro sobre o
Ensino de Engenharia Química
Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro

útil de frutas frescas, e, especialmente, a falta de uso desses frutos como produtos processados (Lago *et al.*, 2006; Asquieri *et al.*, 2004).

A fim de reduzir perdas e prolongar o tempo de vida útil dos frutos é necessária a aplicação de tecnologias. A secagem surge como uma alternativa, pois prolonga o tempo de consumo da fruta como produto acabado, e como matéria prima podendo ser adicionada em alimentos mais elaborados aumentando a oferta em períodos em que a safra tenha finalizado. Além de poder contribuir com a redução das perdas em decorrência da deterioração, esta técnica consegue retirar grande parte da água livre da fruta, permitindo o transporte e armazenamento a um custo relativamente baixo. (Oliveira, 2014). Resende *et al.* (2010) apontam a secagem como um importante processo na conservação dos produtos agrícolas, baseando-se no fato que, microrganismos, enzimas e todos os mecanismos metabólicos são dependentes do teor de água para realizar suas atividades.

A simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água são de fundamental importância para entender e otimizar o processo de secagem (Berbet *et al.*, 1995). Para a simulação são utilizados modelos matemáticos que representam satisfatoriamente a perda do teor de água do produto durante o período de secagem (Goneli *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2013).

Os modelos de cinética de secagem são aplicados de modos diferentes, dependendo do período considerado (Morais, 2010). Na literatura, vários modelos foram propostos para analisar a secagem de produtos higroscópicos, os quais são classificados em: teóricos, semiteóricos e empíricos (Martinazzo *et al.*, 2007). Entre os modelos semiteóricos, o modelo de Dois Termos, o de Henderson e Pabis, o de Page e o de Page Modificado e Midilli têm sido amplamente utilizados em processos de secagem de produtos alimentícios (Siqueira *et al.*, 2013). Dentre os modelos teóricos, inclui-se o modelo difusivo, no qual inclui-se a equação de balanço de massa de água no interior do produto proposta pela lei de Fick, que expressa o fluxo de massa por unidade de área como sendo proporcional ao gradiente de concentração de água. Esta tem sido amplamente utilizada para descrever processos de secagem durante o período de taxa decrescente para a maioria dos materiais biológicos e tem apresentado bons resultados tanto para produtos de origem vegetal quanto para os de origem animal (Srikiatden & Roberts, 2006; Hassini *et al.*, 2007; Oliveira, 2009; Celma *et al.*, 2009; Puente-Díaz *et al.*, 2013; Araujo, 2000).

O presente trabalho teve como principal objetivo estudar a cinética de secagem da jabuticaba *in natura* em diferentes temperaturas, através de modelos matemáticos de secagem e avaliá-los por meio de indicadores de desempenho.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Tratamento Experimental

O presente estudo foi executado no laboratório de inovação em secagem (LIS) localizado no departamento de tecnologia de alimentos (DTA), na Universidade Federal de Sergipe (UFS). As jabuticabas foram compradas no comércio local da cidade de Estância, SE e transportada para o

PROMOÇÃO

REALIZAÇÃO

ORGANIZAÇÃO



laboratório sob resfriamento em caixa térmica com gelo. Em seguida, a matéria prima foi sanitizada em solução de cloro ativo a 200 ppm por 10 min e posteriormente realizou-se o enxágue dos frutos em solução de cloro ativo a 3 ppm por 5 min. Após a sanitização, as frutas foram armazenadas em freezer convencional a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Modelo CVU18, Consul) até os experimentos de secagem.

Realizou-se a secagem das frutas inteiras em estufa (Modelo TE-394/2, Tecnal) em duas temperaturas diferentes, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, por 24,7 h e 20,17 h, respectivamente, e com a velocidade do ar de secagem de $1,86 \pm 0,162\text{ m/s}$ medida com um anemômetro digital (NA-3050, Icel Manaus). Com isto, para a construção da cinética de secagem, pesou-se as bandejas com as amostras em determinados intervalos de tempo, inicialmente 30 min, em seguida 60 min e no fim do processo, a cada 120 min.

2.2. Tratamento Matemático

Com o intuito de determinar a cinética de secagem da casca de jabuticaba e avaliar os modelos matemáticos de secagem, determinou-se a razão de umidade dos dados experimentais, através da Equação 1.

$$RU = \frac{(U(t) - U_{eq})}{(U_i - U_{eq})} \quad (1)$$

As curvas de secagem obtidas experimentalmente foram ajustadas com os seguintes modelos: modelo de Page (Equação 2), Midilli (Equação 3), Henderson e Pabis (Equação 4) e Difusivo com dois termos para esfera (Equação 5). Utilizou-se o software STATISTICA® versão 11.0 para Windows para a estimação de parâmetros, no qual foi realizada uma análise de regressão não linear pelo método Levenberg-Marquardt cuja função de perda foi o método dos mínimos quadrados.

$$RU = \exp(-k \cdot t^N) \quad (2)$$

$$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t^N) + b \cdot t \quad (3)$$

$$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) \quad (4)$$

$$RU = \frac{6}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^2 \frac{1}{n^2} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot n^2 \cdot D \cdot t}{r^2}} \quad (5)$$

Para a avaliação do modelo no qual haja o melhor ajuste aos dados experimentais, foi utilizado os índices de desempenho descritos por Ross (1996) que são: raiz do erro quadrático médio (REQM) (Equação 6), erro padrão de predição (%SEP) (Equação 7), fator de viés (B_f) (Equação 8) e fator de precisão (A_f) (Equação 9). Utilizou-se software Excel® versão 2007 para Windows para o tratamento de dados.

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum(\text{obs} - \text{pred})^2}{n}} \quad (6)$$

$$\%SEP = \frac{100}{\text{mean obs}} \sqrt{\frac{\sum(\text{obs}-\text{pred})^2}{n}} \quad (7)$$

$$B_f = 10^{\frac{\sum \log\left(\frac{\text{pred}}{\text{obs}}\right)}{n}} \quad (8)$$

$$A_f = 10^{\frac{\sum |\log\left(\frac{\text{pred}}{\text{obs}}\right)|}{n}} \quad (9)$$

3. RESULTADOS

As cinéticas de secagem da jabuticaba em temperaturas diferentes estão representadas graficamente pela Figura 1. Como pode ser visto, a temperatura do ar de secagem tem uma influência significativa na taxa de secagem, e conseqüentemente, no tempo final de secagem. Este fato também foi observado por Doymaz (2004) na secagem convectiva de finas camadas de cenoura em diferentes temperaturas (50 °C – 70 °C). Nota-se que à temperatura de 50 °C, o período constante de secagem foi predominante no processo, e este teve uma duração maior quando comparado à temperatura de 60 °C. Por outro lado, observa-se que o período a taxa constante foi inferior e aconteceu somente no início da secagem na temperatura de 60 °C, além disso, o período a taxa decrescente foi predominante a esta temperatura, como foi visto no estudo de Babalis *et al.* (2006) no estudo da secagem de figo em temperaturas diferentes.

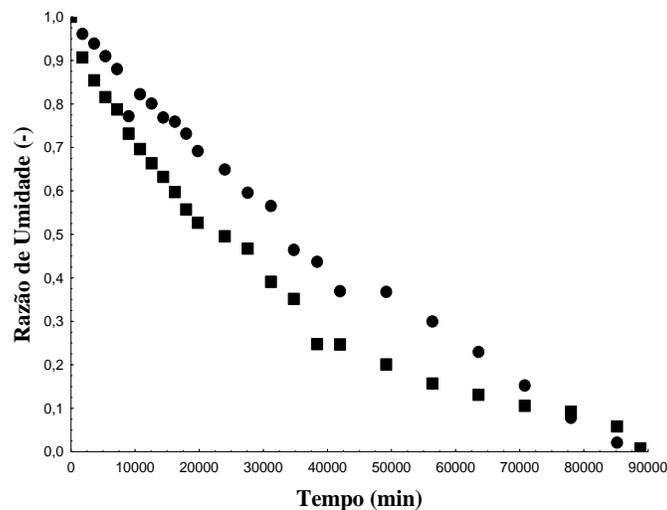


Figura 1 – Razão de umidade a temperatura de 50 °C (●) e a temperatura de 60 °C (■).

As constantes do modelo estimadas por regressão não-linear podem ser vistas na Tabela 1. O parâmetro k é definido como uma constante de secagem (s^{-1}) observa-se que nos modelos estudados, os valores apresentados foram maiores para temperatura de 60 °C, exceto pelo modelo de Midilli, fato este que pode ser explicado pela temperatura superior do ar de secagem que provoca um aumento na taxa de secagem. Além disso, verifica-se que a difusividade efetiva da água da jabuticaba foi $9,23 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,56 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, nas temperaturas de 50 °C e 60 °C, respectivamente. Os valores da

difusividade efetiva estimados no presente trabalho foram condizentes com a faixa de valores para produtos alimentícios presente na literatura, no qual varia de 10^{-9} a 10^{-11} m²/s (Azzouz *et al.*, 2002).

Tabela 1 – Constantes dos modelos em diferentes temperaturas

Modelos	Temperatura de secagem(°C)	Constantes dos modelos	Temperatura de secagem(°C)	Constantes dos modelos
Page	50	$k = 1,37 \times 10^{-6}$ $n = 1,2632$	60	$k = 7,79 \times 10^{-6}$ $n = 1,1511$
Midilli	50	$k = 1,43 \times 10^{-4}$ $n = 0,7552$ $a = 1,0176$ $b = -5,32 \times 10^{-6}$	60	$k = 1,04 \times 10^{-5}$ $n = 1,1053$ $a = 0,9637$ $b = -1,20 \times 10^{-6}$
Difusivo	50	$D = 9,23 \times 10^{-11}$	60	$D = 1,56 \times 10^{-10}$
Henderson e Pabis	50	$k = 2,35 \times 10^{-5}$ $a = 1,0452$	60	$k = 3,72 \times 10^{-5}$ $a = 1,0186$

Com o intuito de avaliar o modelo mais adequado para o processo estudado, aplicaram-se os indicadores de desempenho descritos por Ross (1996), estes podem ser analisados na Tabela 2. De acordo com Ross (1996), o índice REQM faz a comparação entre os valores experimentais e preditos, portanto, o aquele modelo que melhor representa os dados experimentais deve apresentar um valor reduzido para este indicador. Neste caso, o modelo de Midilli foi o que obteve os menores valores para as temperaturas estudadas, seguido do modelo de Page que obteve valores próximos ao modelo de Midilli. O erro padrão de predição (%SEP) indica o residual dos modelos, com isto, seu valor deve ser reduzido. Dentre os modelos avaliados, o modelo de Midilli obteve o melhor resultado novamente, seguido do modelo de Page. O fator de viés (B_f) é o parâmetro que melhor avalia o desempenho do modelo, pois este está relacionado com a concordância entre os valores preditos e observados representado por $B_f = 1$. O modelo que apresentou valores mais próximo de 1 foi o modelo de Midilli para ambas as temperaturas. Por fim, o fator de precisão (A_f) indica a diferença média entre os dados preditos e observados, contudo uma maior precisão do modelo é observada quando este valor é reduzido. O modelo de Midilli apresentou os valores reduzidos para as temperaturas estudadas.

Tabela 2 – Indicadores de desempenho referente a cada modelo

Modelos	Temperatura de secagem (°C)	Indicadores de desempenho	Temperatura de secagem (°C)	Indicadores de desempenho
Page	50	REQM = 0,0391 %SEP = 6,8520 $B_f = 1,4031$ $A_f = 1,4814$	60	REQM = 0,0270 %SEP = 5,9966 $B_f = 1,3948$ $A_f = 1,428$
Midilli	50	REQM = 0,0241 %SEP = 4,2191 $B_f = 1,1951$ $A_f = 1,2320$	60	REQM = 0,0157 %SEP = 3,4860 $B_f = 1,1441$ $A_f = 1,2213$
Difusivo	50	REQM = 0,1595 %SEP = 27,97 $B_f = 1,4529$ $A_f = 1,9246$	60	REQM = 0,1255 %SEP = 27,8547 $B_f = 1,5738$ $A_f = 1,9826$
Henderson e Pabis	50	REQM = 0,0528 %SEP = 9,2486 $B_f = 1,4885$ $A_f = 1,5623$	60	REQM = 0,0355 %SEP = 7,8849 $B_f = 1,4789$ $A_f = 1,5527$

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que o modelo de Midilli se ajustou melhor aos dados experimentais, para ambas as temperaturas estudadas, 50 °C e 60°C. Entretanto, o modelo de Page apresentou resultados similares com o modelo de Midilli nas temperaturas estudadas. Este resultado também foi encontrado por Soares *et al.* (2014) em um estudo da secagem de jaca a 50 °C, sendo o modelo de Midilli o que melhor se ajustou aos dados experimentais. Diante disto, o modelo de Page pode ser considerado o mais adequado para este processo, já que este modelo necessita somente da estimação de dois parâmetros, em contrapartida com o modelo de Midilli que necessita de quatro parâmetros para ser estimado.

4. CONCLUSÃO

O estudo da cinética de secagem com a avaliação de modelos matemáticos por meio de indicadores de desempenho foi realizado no presente trabalho. Verificou-se que o modelo de Midilli teve um melhor ajuste aos dados experimentais de acordo com os indicadores de desempenho, no entanto este modelo necessita-se estimar quatros parâmetros, já o modelo de Page obteve resultados semelhantes ao de Midilli com a estimação de somente dois parâmetros, fazendo com que, este modelo seja o mais adequado para descrever a cinética da jabuticaba nessas condições de secagem. Neste estudo foi demonstrada a importância de o uso de indicadores de desempenho para melhor

avaliar o modelo mais apropriado para o processo de secagem.

5. NOMENCLATURA

D = difusividade efetiva (m^2/s)

k = constante de secagem (s^{-1})

n = número de termos

N, a e b = constantes do modelo (adimensional)

r = raio (m)

RU = razão de umidade (adimensional)

t = tempo (s)

U(t) = umidade no tempo t em base seca (%)

U_{eq} = umidade no equilíbrio, em base seca (%)

U_i = a umidade inicial, em base seca (%)

6. REFERÊNCIAS

ARAUJO, E. A. F. *Estudo da Cinética de Secagem de Fatias de Banana Nanica (Musa acuminiata var. Cavendish) Osmoticamente Desidratados*. 2000. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil. 2000.

ASQUIERI, E. R., CANDIDO, M. A., DAMIANI, C., ASSIS, E. M. Fabricación de vino blanco y tinto de jabuticaba (*Myrciaria jabuticaba* Berg) utilizando la pulpa y la cáscara respectivamente. *Alimentaria*, v. 355, p. 97-109, 2004.

AZZOUZ, S.; GUIZANI, A.; JOMAA, W.; BELGHITH, A. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *J. Food Eng.*, v. 55, p. 323–330, 2002.

BABALIS, S. J.; BELESSIOTIS, V. G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *J. Food Eng.*, v. 65, p. 449-458, 2004.

BERBET, P. A. et al. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. *J. Agric. Eng. Res.*, v. 60, n. 3, p. 167-173, 1995.

CELMA, A. R.; LÓPEZ-RODRÍGUEZ, F.; BLÁZQUEZ, F. C. Experimental modeling of infrared drying of industrial grape by-products. *Food Bioprod. Process.*, v.87, p.247-253, 2009.

DOYMAZ, I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *J. Food Eng.*, v. 61, p. 359–364, 2004.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; REIS NETO, S.A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, v. 27, n. 1, p. 135-140, 2007.

HASSINI, L.; AZZOUZ, S.; PECZALSKI, R.; BELGHITH, A. Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage. *J. Food Eng.*, v.79, p.47-56, 2007.

LAGO E.S., GOMES E. & SILVA R. Produção de geléia de jambolão (*Syzygium cumini lamarck*): processamento, parâmetros físico – químicos e avaliação sensorial. *Ciênc. Tecnol. Aliment.*



XXI Congresso Brasileiro
de Engenharia Química

Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro



XVI Encontro Brasileiro sobre o
Ensino de Engenharia Química
Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro

2006; 26(4): 847-852.

- LIMA, A. J. B.; CORRÊA, A. D.; ALVES, A. P. C.; ABREU, C. M. P.; DANTAS-BARROS, A. M. Caracterização química do fruto jabuticaba (*Myrciaria cauliflora* Berg) e de suas frações. *Arch. Latinoam. Nutr.*, v. 58, n. 4, p. 416-421, 2008.
- MARTINAZZO, A. P. et al. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.*, v. 11, n. 3, p. 301-306, 2007.
- MORAIS, S. J. S. *Cinética de secagem de grãos de feijão-caupi (Vigna unguiculata (L.) Walp.)*. 2010. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Goiás, Anápolis. 2010.
- OLIVEIRA, F. I. P. *Influência do pré-tratamento ultrassom e desidratação osmótica na secagem, cor, textura e enzimas do mamão formosa*. 2014. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2014.
- OLIVEIRA, R. A. *Estudo da secagem em dois tipos de secadores: Avaliação dos parâmetros operacionais e comportamento do material seco*. 2009. 218f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- PUENTE-DÍAZ, L.; AH-HEN, K.; VEGA-GÁLVEZ, A.; LEMUS-MONDACA, R.; DI SCALA, K. Combined infrared-convective drying of murta (*Ugni molinae* Turcz) berries: Kinetic modeling and quality assessment. *Drying Technol.*, v.31, p.329-338, 2013
- RESENDE, O.; RODRIGUES, S.; SIQUEIRA, V.C.; ARCANJO, R.V. Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de chão batido. *Acta Amaz.*, v.40, n 2, p. 247 – 256, 2010.
- ROSS, T. Indices for performance evaluation of predictive models in food microbiology. *J. Appl. Bacteriol.*, v. 81, p. 501 – 508, 1996.
- SANTOS, D. C. et al. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.*, v. 17, n. 2, p. 223–231, 2013.
- SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Mathematical modelling of the drying of jatropha fruit: an empirical comparison. *Rev. Ciênc. Agron.*, v. 44, n. 2, p. 278-285, 2013.
- SOARES, D. S. C.; COSTA, D. G.; SANTOS, J. T. S.; ABUD, A. K. S.; NUNES, T. P.; OLIVEIRA Júnior. The use of performance indicators for evaluating models of drying jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* L.): Page, Midilli, and Lewis. *International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering*, v. 8, n. 2, 2014.
- SRIKIATDEN, J.; ROBERTS, J. S. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. *J. Food Eng.*, v.74, p.143-152, 2006.