

MODELAGEM DA DIFUSIVIDADE EFETIVA EM CASCA E POLPA DO ABRICÓ (*Mammea americana*) SUBMETIDAS A SECAGEM EM DIFERENTES TEMPERATURAS

D. C. SILVA¹, M. F. LIMA¹, T. J. SANTOS¹, A. A. SANTANA¹ e H. A. V. VELLEZ¹

¹ Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências Exatas e suas Tecnologias,
Departamento de Engenharia Química
E-mail para contato: dennys.correia@hotmail.com; harveyvilla@gmail.com

RESUMO – O objetivo do presente trabalho foi a obtenção das curvas de secagem, o ajuste do modelo da difusão líquida e a determinação dos coeficientes de difusão de folhas da casca e polpa da fruta abricó (*Mammea americana*), submetidas a diferentes temperaturas do ar de secagem. Para uma eventual comparação dos resultados, realizaram-se os tratamentos de secagem com três níveis de temperatura do ar de secagem (40, 50 e 60°C). Os valores da difusividade efetiva obtidos variaram $1,20 \times 10^{-04}$ a $5,95 \times 10^{-04} \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ e $1,40 \times 10^{-04}$ a $3,50 \times 10^{-04} \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ para a casca e polpa do abricó, respectivamente. A difusividade aumentou com o aumento da temperatura do ar de secagem e a energia de ativação para a difusão líquida variou de $3,061 \text{ KJ mol}^{-1}$ para a casca do abricó e $3,979 \text{ KJ mol}^{-1}$ para a polpa do mesmo além de erros relativos médios abaixo de 0,1.

1. INTRODUÇÃO

De nome científico *Mammea americana*, o abricó também pode ser conhecido como abricó-do-pará, abricote e abricoteiro. Seu fruto é carnoso, possui somente uma semente, é duro e redondo. É consumido principalmente nos Estados Unidos, e no Brasil, é mais consumido no estado do Pará. A árvore é frondosa, grande e piramidal e pode chegar aos 15 metros de altura. As folhas podem medir até 14 cm de comprimento, e são pecioladas. As flores são brancas, perfumadas e aparecem solitárias ou em pares opostos (PETRIN, 2016).

Por se tratar de uma fruta ainda silvestre a colheita ainda tem caráter extrativista, e, depois da coleta os frutos são repassados para intermediários a um baixo custo e revendidos em mercados maiores a um valor mais elevado. No atual cenário, a demanda é pequena e destinada apenas aos consumidores locais (BRAGA et al., 2010). Apesar de o congelamento ser o método mais clássico de conservação da polpa, o acondicionamento pela secagem também pode ser considerado por se basear no fato de que tanto os microrganismos como as enzimas e todo o mecanismo metabólico necessitam de certa quantidade de água para suas atividades. Com a redução da água disponível, consequentemente serão reduzidas a atividade de água e a velocidade das reações químicas no produto, bem como o desenvolvimento de microrganismos (MARTINAZZO et al., 2007; VASCONCELOS, 2015).

O processo de secagem é uma técnica antiga para conservação de alimentos, tratando-se da remoção de água ou qualquer outro líquido do alimento na forma de vapor para o ar não saturado. Esta técnica vem sendo constantemente estudada e aperfeiçoada para obtenção de produtos com maior qualidade e menor tempo de processamento. É também uma das operações mais complexas e menos entendida, devido à dificuldade e deficiência da descrição matemática dos fenômenos envolvidos de transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento no sólido. Assim a secagem é um conjunto de ciência, tecnologia e arte, ou seja, um know-how baseado em extensiva observação experimental e experiência operacional (MENON; MUJUMDAR, 1987). Este trabalho teve por finalidade determinar e avaliar a difusividade da umidade durante a desidratação da polpa e casca de abricó em diferentes temperaturas de secagem.

2. MATERIAS E MÉTODOS

2.1. Matérias-Primas

Os frutos de abricó foram adquiridos no Centro Estadual de abastecimento S/A (CEASA) da cidade de São Luís (MA). Para a realização dos experimentos os frutos foram lavados com solução sanitizante, retirando-se as partes doentes e danificadas, assim como qualquer parte de outro vegetal ou material estranho. Uma vez limpo o fruto, foi retirada a casca da polpa com ajuda de uma faca e, após, foram formadas pequenas placas retangulares com medidas 6,0x2,5x0,21 cm e 6,0x2,5x0,3 cm para a casca e polpa respectivamente. Assim, as placas de casca e polpa de abricó foram usadas para os experimentos de secagem. Para cada ensaio experimental de secagem foram usadas três amostras de cada material.

2.2. Procedimento Experimental

A secagem para a casca e polpa de abricó foi realizada em uma estufa de ar convectivo às temperaturas de 40, 50 e 60 °C. Para cada condição experimental de temperatura de secagem, foram realizadas pesagens periódicas em balança semi-analítica (precisão 0,001 g) até atingir-se massa constante, conforme o método de Silva et al. (2016). Uma vez terminado cada experimento, a umidade do sólido foi determinada por gravimetria usando estufa a vácuo a 105 °C durante 24 h, sendo que as curvas de secagem foram expressas em função do teor de água em base seca “b.s.”.

Para o cálculo da razão de umidade (RU), durante a secagem nas diferentes condições de ar, utilizou-se a Equação (1).

$$RU = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \quad (1)$$

onde X é o teor de umidade no tempo de secagem (g/g, b.s.); X_e é o teor de umidade de equilíbrio (g/g, b.s.); X_o é o teor de umidade inicial (g/g, b.s.).

Para o cálculo da difusividade efetiva (D_{eff} , mm² s⁻¹), foi utilizada a Eq. (2) derivada da solução analítica baseada na Lei de Fick, com espessura de corte L de 0,21 cm para a casca e 0,3 cm para a polpa (espessura do produto). Realizou-se análise de regressão não linear, pelo

método Simplex e Quasi-Newton, utilizando-se o programa computacional *statistica* 7.0. A solução analítica da Equação (2) apresenta-se na forma de uma série infinita e, portanto, o número finito de termos (n) no truncamento pode determinar a precisão dos resultados (MARTINAZZO et al., 2007), com as seguintes condições inicial e de contorno (CRANK, 1975): umidade inicial uniforme (Equação (3)), umidade máxima no centro (Equação (4)) e umidade constante na superfície (Equação (5)).

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} \frac{t}{4L^2} \right] \quad (2)$$

$$X_{(x,t)} = X_{(x,0)} = X_0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial X}{\partial x}(x=0) = 0 \quad (4)$$

$$X_{(x,t)} = X_{(L,t)} = X_e \quad (5)$$

A variação do coeficiente de difusão de acordo com a temperatura de secagem foi analisada utilizando-se a relação de Arrhenius (Equação (6)). É usual considerar-se o valor do coeficiente de difusão constante ou linearmente dependente da temperatura, podendo essa relação ser expressa por meio deste modelo.

$$D_{eff} = A \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \quad (6)$$

onde A é o fator pré exponencial ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), E_a é a energia de ativação (J mol^{-1}), R é a constante universal dos gases ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e T é a temperatura absoluta (K).

Para a modelagem e simulação foi avaliado o grau de ajuste do modelo aos dados experimentais em função da magnitude do coeficiente de determinação ajustado (R^2) e do erro médio estimado (MRE) (%) (Equação (7)).

$$MRE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_i - X_i^*|}{X_i} \quad (7)$$

Em que: X_i é o valor observado experimentalmente; X_i^* é o valor calculado pelo modelo e N é o número de valores experimentais. Além disso, com o intuito de analisar o erro de ajuste (e_i) do modelo estatístico foi realizada a comparação entre os resultados experimentais e calculados pelo modelo (X_{cal}), conforme a Equação (8).

$$e_i = X_i - X_i^* \quad (8)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

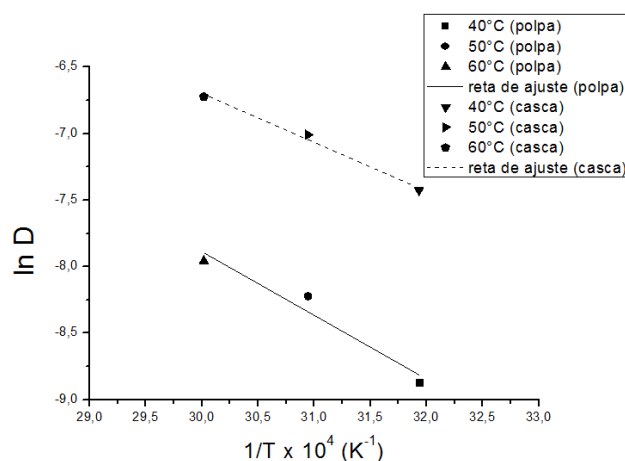
Os valores da difusividade efetiva (D_{eff}) obtidos para os diferentes tratamentos estão apresentados na Tabela 1, como também as medidas de ajuste do modelo (erro relativo médio, MRE , e coeficiente de determinação, R^2), o qual foi ajustado aos dados obtidos pela Eq. (2) com aproximação de dez termos, a partir do qual se observou que o valor de D_{eff} não variava.

Tabela 1 – Valores da difusividade efetiva (D_{eff}) obtidos para a casca e a polpa do abricó em diferentes temperaturas do ar de secagem.

Temperatura (°C)	Casca			Polpa		
	Difusividade ($\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$)	MRE (%)	R^2	Difusividade ($\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$)	MRE (%)	R^2
40°C	$5,95 \times 10^{-04}$	0,255	0,983	$1,40 \times 10^{-04}$	5,722	0,847
50°C	$9,04 \times 10^{-04}$	0,494	0,920	$2,69 \times 10^{-04}$	2,159	0,971
60°C	$12,0 \times 10^{-04}$	0,079	0,912	$3,50 \times 10^{-04}$	4,183	0,988

Observa-se que os valores de difusividade variaram de $1,20 \times 10^{-4}$ a $5,95 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $1,40 \times 10^{-4}$ a $3,50 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ na faixa de temperatura de 40 a 60 °C para a casca e polpa do abricó, respectivamente. Segundo Rizvi (1986) e Martinazzo et al. (2007), a difusividade efetiva depende das características do ar de secagem e das demais propriedades físico-químicas do material que se relacionam à espécie e à variedade. Os valores calculados de D_{eff} para cada temperatura estão apresentados na Figura 1 na forma de “ln D” plotados em função do inverso da temperatura absoluta (1/T). As retas obtidas indicam a uniformidade de variação da difusividade com a variação da temperatura.

Figura 1 – Representação de Arrhenius para a relação entre a difusividade efetiva e a temperatura absoluta para cada temperatura de secagem da casca e da polpa do abricó.



A energia de ativação (E_a) calculada como a inclinação das retas obtidas está representada na Tabela 2, assim como a umidade final de secagem do produto. Observa-se que os valores da energia de ativação além de serem muito próximos foram extremamente baixos, comportamento esperado, pois a energia de ativação é influenciada pela taxa de transferência de calor que por sua vez é influenciada pelo tamanho de partículas e pela quantidade de massa a ser trabalhada (no caso as amostras possuíam 6,5 g de massa em

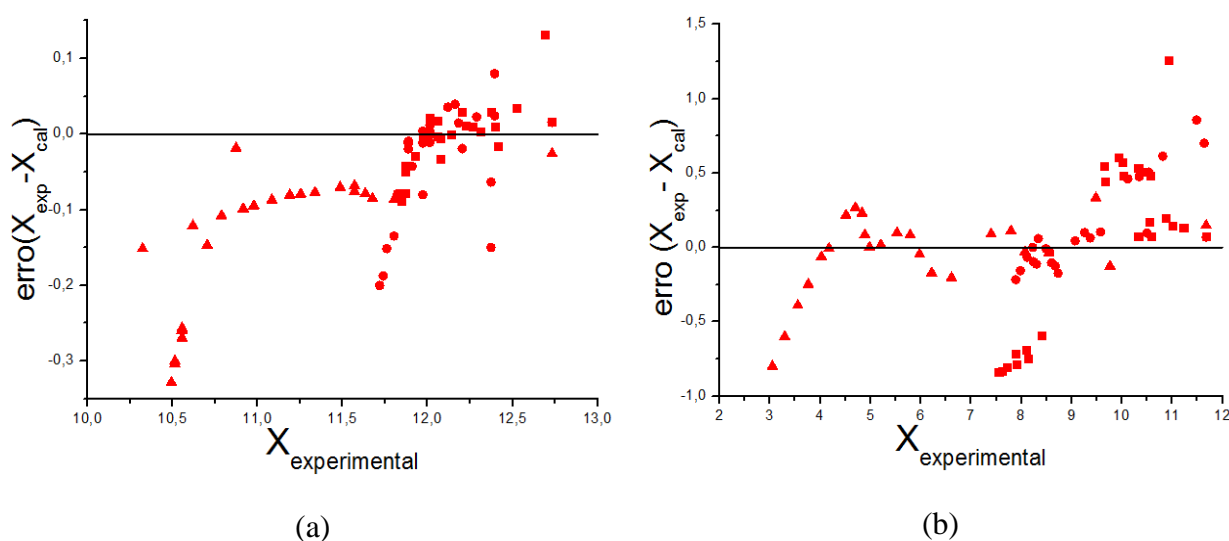
triplicata). Segundo Martinazzo (2007), quanto menor for o tamanho das partículas, mais rápido acontece o aquecimento das mesmas (maior a taxa de transferência de calor) e menor a energia de ativação.

Tabela 2 – Valores da energia de ativação (E) obtidos para a casca e a polpa do abricó devido as diferentes taxas de temperatura de secagem.

Abricó	Energia de Ativação (KJ mol ⁻¹)	Teor de umidade em base seca (X) (g/g)
Casca	3,061	12,732
Polpa	3,979	11,675

Observa-se na Figura 2 que o erro máximo obtido, entre todos os vetores, para a casca foi de 1,516 e para a polpa foi de 1,216. Apesar destes valores, verifica-se que a modelagem da secagem da casca apresentou uma precisão média de -0,046 e para a modelagem de polpa, uma precisão média de 0,067, indicando uma baixa tendência de erro e uma previsão satisfatória da cinética de secagem a partir do modelo difusivo.

Figura 2 – Erro de ajuste versus dados experimentais para (a) casca e (b) polpa onde (■) 40°C, (●) 50°C e (▲) 60°C



4. CONCLUSÃO

Foram obtidos valores da difusividade efetiva obtidos na secagem da casca e polpa do abricó nas temperaturas de 40, 50 e 60°C. No geral, a difusividade tendeu a aumentar com o aumento da temperatura do ar de secagem e a dependência do coeficiente de difusão em relação à temperatura foi descrita pela equação de Arrhenius. Os valores dos erros médios estão de acordo com o esperado, uma vez que para a casca apresentou-se um valor de -0,046 e para a polpa de 0,067, os quais são valores inferiores a 0,1. Finalmente, sugere-se realizar novos estudos cinéticos utilizando estes materiais, assim como as isotermas de dessorção para as mesmas temperaturas de estudo, com a finalidade de determinar o coeficiente difusivo em função da umidade de equilíbrio do sistema.

5. REFERÊNCIAS

- BRAGA, A. C. C.; SILVA, A. E.; PELAIS, A. C. A.; BICHARA, C. M. G.; POMPEU, D. R. Atividade antioxidante e quantificação de compostos bioativos dos frutos de abricó (*Mammea americana*). *Alimentos e Nutrição*, v.21, n.1, p. 31-36, 2010.
- MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; MELO, E. C.; BARBOSA, F. F. Difusividade efetiva em folhas de *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf submetidas à secagem com diferentes comprimentos de corte e temperaturas do ar. *Revista Brasileira Pl. Med.* V. 9, n. 1, p. 68-72, 2007.
- MENON, A. S., MUJUMDAR, A. S. Drying of solids: principles, classification and selection of dryers. *Handbook of Industrial Drying*. New York: Marcel Dekker Inc., 1987.
- PETRIN, N. Disponível em: <http://beneficiosnaturais.com.br/abrico-beneficios-e-propriedades-dessa-fruta/> Acesso em 29/11/2016.
- RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. *Engineering properties of foods*. New York: Marcel Dekker Inc, p. 389-391, 1986.
- SILVA, D. C.; PESSOA, M. A.; LIMA, M. F.; VÉLEZ, H. A. V.; SANTANA, A. A. Estudo da modelagem de cinética de secagem da polpa de cupuaçu na produção de biopolímeros. 3º Encontro Nordeste de Ciência e Tecnologia de Polímeros, Fortaleza, 2016.
- VASCONCELOS, P. S. P. M. *Compostos bioativos do abricó (Mammea americana), fruta da região amazônica brasileira*. 2015. 143 f. Tese (Doutorado em Ciência de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.