

DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE E ENERGIA DE ATIVAÇÃO PARA BANANA VERDE E MADURA E ANÁLISE DA CINÉTICA DE SECAGEM PELO PROCESSO FOAM-MAT

L. B. ARAUJO¹, C. E. M. R. GURGEL² e M. F. D. MEDEIROS¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Química

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

E-mail para contato: laryssaphb@hotmail.com

RESUMO – A técnica de secagem foam-mat consiste na desidratação da espuma obtida através do batimento de líquidos ou pastas com adição de substâncias emulsificantes por meio do contato da superfície da emulsão com ar aquecido. É um processo com baixo custo de operação e alto rendimento que utiliza pequeno tempo de secagem devido à elevada área de contato exposta ao ar aquecido. Estudou-se a cinética de secagem da espuma de banana madura e verde utilizando albumina como agente emulsificante. Aos dados experimentais da razão de umidade em função do tempo foi ajustado o modelo de Page, que se mostrou adequado para representar a cinética de secagem da espuma de ambas as bananas. O coeficiente de difusão efetiva representa a interação de todos os parâmetros que influenciam na transferência de massa. Para obtê-lo, foi aplicada uma solução analítica à segunda lei de Fick, truncada no sétimo termo. Os valores de difusividade encontrados neste trabalho estão dentro da faixa relatada em ensaios com alimentos. A energia de ativação para que ocorra a difusão foi calculada pela relação dos valores de difusividade e a equação de Arrhenius.

1. INTRODUÇÃO

A banana é uma das frutas mais consumidas no mundo devido a seu alto teor nutricional, baixo custo além de cultivo simples e colheita permanente durante todo o ano. A polpa da banana verde é uma massa sem sabor, com baixo teor de açúcares (RODRÍGUEZ-AMBRIZ et al., 2008), sendo o amido o principal componente, representando de 55% a 93% da quantidade de sólidos totais do fruto (EMBRAPA, 2009). Já a banana madura possui polpa macia e doce, com uma quantidade considerável de carboidratos, 23%, que são facilmente assimiláveis, e cerca de 1,1% de proteínas (USDA, 2011). Entretanto, a fruta apresenta um rápido escurecimento devido à atividade enzimática que é ligada à quantidade de água presente no fruto, diminuindo sua vida de prateleira e limitando sua aplicação.

A secagem é um processo largamente utilizado na indústria de polpas de frutas, pois concentra os componentes da matéria-prima e aumenta o tempo de conservação, diminuindo perdas. A secagem em camada de espuma, ou foam-mat, consiste na desidratação da espuma formada pelo batimento de líquidos ou pastas com adição de substâncias emulsificantes em

contato com ar quente, resultando em um pó de baixa umidade. É um processo vantajoso devido ao seu baixo custo, alto rendimento.

Neste trabalho, foi utilizada uma camada de 1,8 cm nas secagens e albumina como agente emulsificante, na concentração de 7,5% para formação da espuma. Foram realizados três ensaios em temperaturas diferentes para cada tipo de banana (60°C, 70°C e 80°C), e aos dados de secagem foram ajustados o modelo de Page.

O coeficiente de difusividade efetiva é importante para projetar e otimizar processos que envolvam transporte interno de umidade (PRASAD *et al.*, 2010). Ele representa a interação de todos os parâmetros que influenciam a transferência de massa e aqui foi obtido a partir de uma solução analítica da segunda lei de Fick, truncada no sétimo termo. Relacionando os valores da difusividade com a equação de Arrhenius foi possível calcular a energia de ativação necessária para que a difusão ocorra.

2. METODOLOGIA

2.1 Preparação do purê e da espuma

Foram utilizadas bananas do tipo Pacovan e a metodologia para os dois tipos de banana foi a mesmo. As bananas eram descascadas e cortadas em rodela, sendo tratadas com metabissulfito de sódio para evitar o escurecimento durante o batimento. A banana ficava imersa na solução por 1 minuto, depois era lavada com água destilada por 30 segundos. As rodela eram então batidas em um processador doméstico para a formação da pasta de banana. Para a obtenção da espuma, era adicionada albumina previamente pesada na concentração de 7,5% da massa da pasta e a mistura era batida com batedeira comum em velocidade máxima por 4 minutos.

2.2 Secagem

A espuma obtida era distribuída em uma placa de alumínio com 1,8 cm de espessura e levada a estufa de circulação de ar regulada na temperatura desejada para o experimento. Para cada tipo de banana foi realizado três ensaios, cada um com uma temperatura diferente (60°C, 70°C e 80°C). Durante a secagem, a placa era tirada da estufa e pesada para medir a quantidade de água evaporada naquele intervalo de tempo. Quando o fim da secagem se aproximou esse intervalo foi aumentado para trinta minutos para que uma mudança significativa fosse notada na massa. Quando a massa ficou contestante, a secagem foi interrompida.

2.3 Aplicação do Modelo de Secagem

Aos dados da cinética de secagem foram aplicados o modelo de Page, pois este representa a perda de água dos alimentos durante a secagem e é descrito pelas equações 1 e 2, abaixo. O software utilizado para o ajuste do modelo foi o Statistica 7.0.

$$RU = \frac{U_{bs} - U_{eq}}{U_{bsi} - U_{eq}} \quad (1)$$

$$RU = e^{-kt^n} \quad (2)$$

Onde RU é a razão de umidade, U_{bs} , U_{eq} e U_{bsi} são umidades em base seca, no equilíbrio e em base seca inicial, k é o parâmetro do modelo de Page (min^{-n}), n é o parâmetro adimensional do modelo e t é o tempo em minutos.

2.4 Obtenção da difusividade efetiva

O coeficiente de difusividade efetiva foi obtido através da solução analítica da segunda lei de Fick (equação 3), truncada no sétimo termo.

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^7 \frac{1}{(2n+1)^2} \text{Exp} \left(- \left(\frac{(2n+1)\pi}{a} \right)^2 D_{ef} t \right) \quad (3)$$

Onde RU é a razão de umidade, D_{ef} é o coeficiente de difusividade efetiva (m^2/s), a é a espessura da placa em metros, n é o número de termos e t é o tempo em segundos.

2.5 Energia de ativação

Os valores da difusividade efetiva podem ser relacionados com a elevação da temperatura do ar de secagem por meio da equação de Arrhenius (equação 4). Para tal, foi utilizado o Microsoft Office Excel.

$$D_{ef} = D_o \text{Exp} \left(\frac{-E}{RT} \right) \quad (4)$$

Onde D_o é o fator pré-exponencial, E é a energia de ativação, R é a constante dos gases ($8,314 \text{ J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$) e T é a temperatura em Kelvin.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes do início da secagem, foi feita uma caracterização das espumas a serem secadas quanto a sua umidade e teor de sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$). Os valores obtidos experimentalmente são expostos na Tabela 1, para ambos os tipos de banana.

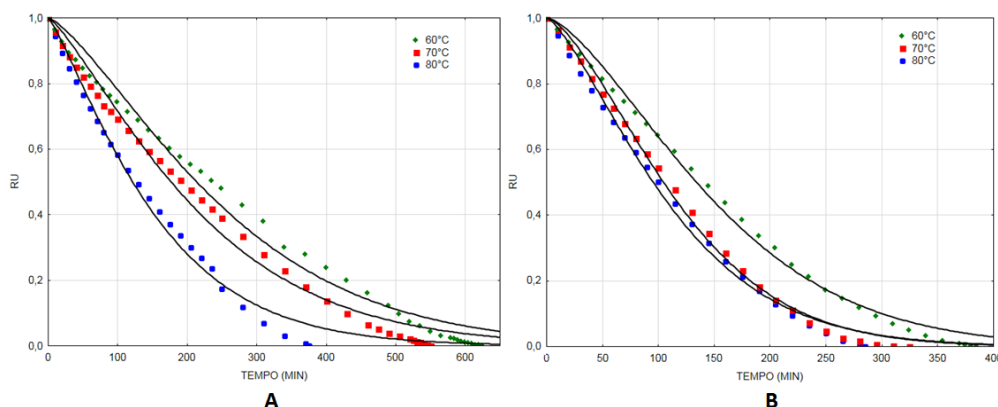
Tabela 1 – Caracterização das espumas de banana madura e verde

	Banana Madura			Banana Verde		
Temperatura (K)	Umidade (%)	Desvio Padrão	Sólidos Solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$)	Umidade (%)	Desvio Padrão	Sólidos Solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$)
333	64,643	0,380	25,037	65,810	0,453	6,883
343	66,323	0,206	23,527	66,808	0,442	6,990
353	64,165	0,049	23,000	67,955	0,003	7,040

Nota-se que o teor de sólidos solúveis na banana madura é bem mais elevado que na banana verde, evidenciando a alta concentração de açúcares na banana madura e a presença de amida na banana verde.

As curvas de secagem com os dados experimentais e preditas pelo modelo de Page são apresentadas na Figura 1, abaixo. A banana madura está indicada por A, e a verde, por B.

Figura 1 – Curvas de secagem da banana madura (A) e banana verde (B), ajustadas ao modelo de Page



Observa-se que, para ambos os tipos de banana, a secagem apresentou o comportamento clássico descrito na literatura. No início, a queda de umidade é alta, diminuindo linearmente com o tempo, o que caracteriza o período de taxa constante. Com o passar do tempo a diminuição da umidade é menos acentuada caracterizando o período de taxa decrescente até atingir um valor constante, quando as condições de equilíbrio são atingidas. Nas curvas também é possível constatar que a secagem da banana madura, embora mais demorada que a da verde para todas as temperaturas estudadas, apresenta o período de constante bastante acentuado.

Na Tabela 2 exibe-se os parâmetros do modelo de Page ajustados aos dados da cinética de secagem das espumas de banana madura e verde.

Tabela 2 – Parâmetros do modelo de Page da banana verde e madura

Tipo de banana	Temperatura (K)	K (min ⁻ⁿ)	N	R ²
Banana Verde	333	0,00047	1,488	0,994
	343	0,00060	1,515	0,996
	353	0,00127	1,383	0,994
Banana Madura	333	0,00049	1,353	0,985
	343	0,00095	1,275	0,987
	353	0,00002	1,218	0,990

Observando os valores do coeficiente de correlação R², superiores a 0,985 em todos os experimentos das bananas verde e da madura, conclui-se que o modelo de Page apresenta um excelente ajuste aos dados das cinéticas de secagem das espumas de banana

Os valores de K indicam uma taxa específica média de secagem. Como esperado, quanto maior a temperatura, maior o valor da taxa de secagem, comportamento observado nas curvas

experimentais apresentadas na Figura 1. Também se nota que os valores de K da banana madura foram maiores que os da banana verde. Isso pode ser explicado pela relação do valor de K com os dois períodos de secagem, e a predominância do período de taxa constante na secagem da espuma da banana madura.

Utilizando a solução analítica para a segunda lei de Fick (equação 3), foram determinados os valores da difusividade efetiva para os dois tipos de banana, em cada uma das temperaturas e os resultados são organizados na Tabela 3, abaixo.

Tabela 3 – Valores da difusividade efetiva $\times 10^{-08} \text{ (m}^2\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$

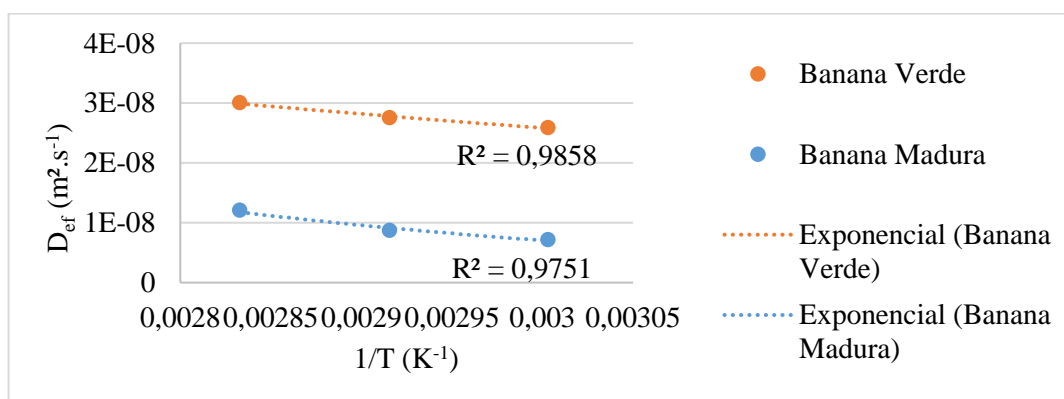
Temperatura (K)	Def _{BM}	Def _{BV}
333	0,715	2,589
343	0,871	2,752
353	1,206	3,004

Observa-se que todos os valores foram na casa de 10^{-08} . Esses valores estão de acordo com a faixa relatada para ensaios com alimentos, que varia entre 10^{-12} e $10^{-08} \text{ (m}^2\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ (MCMINN & MAGEE, 1999).

Nota-se claramente que o valor da difusividade efetiva aumenta com a temperatura e é menor para a banana madura em todas as condições. Isso pode ser explicado pois o modelo da lei de Fick é aplicado apenas ao período de taxa decrescente da secagem, onde a banana madura já perdeu boa parte da sua umidade, refletindo em uma baixa difusividade.

Para determinar a energia de ativação, que segundo Kashaninejad et al. (2007) indica a barreira a ser vencida para que ocorra a difusão da água através no produto, foi aplicada aos valores de difusividade em função do inverso da temperatura a relação de Arrhenius, representada graficamente representada na Figura 2.

Figura 2 – Gráfico da relação da difusividade com a temperatura



Nas condições abordadas neste trabalho, a energia de ativação para a difusão na banana verde é de 7,246 kJ/mol, e para banana madura é de 25,499 kJ/mol. Observa-se que quanto maior a difusividade, menor a energia de ativação necessária para que ela ocorra.

Vários outros autores estudaram a energia de ativação para a difusão em alimentos, como Resende et al. (2007), que encontraram o valor de 6,748 kJ/mol para o feijão, e Furtado et al (2010) que encontraram valores entre 36 e 40,81 kJ/mol para a polpa de ceriguela para secagens entre 60 e 80°C. Zogzas et al. (1996) apresentam a faixa entre 12,7 e 110 kJ/mol para produtos agrícolas. As energias de ativação encontradas estão em concordância com as de outros alimentos encontradas na literatura. Os valores relativamente baixos encontrados neste estudo indicam que a banana verde e madura tem maior facilidade para absorver água (Resende et al., 2007).

4. CONCLUSÃO

De maneira geral, o aumento da temperatura do ar de secagem influencia tanto na taxa de secagem quanto na difusividade efetiva. O modelo de Page ajustado aos dados experimentais apresentou ótimos coeficientes de correlação, todos acima de 98%, o que indica que o modelo descreve bem a secagem. Com o aumento da temperatura ao coeficiente K que representa uma taxa específica média de secagem também aumenta, indicando uma secagem mais rápida. Vale ressaltar que esse coeficiente se relaciona com os dois períodos da secagem. A predominância do período de taxa constante na secagem da banana madura, onde há uma perda acentuada de umidade, faz com que os valores de K sejam maiores que para a banana verde. Os coeficientes de difusividade obtidos são da ordem e grandeza de 10^{-09} e 10^{-08} , dentro da faixa esperada para ensaios com alimentos e aumenta com a temperatura. A energia de ativação apresentada pela banana verde foi 7,246 kJ/mol, e 25,499 kJ/mol pela banana madura, valores condizentes com os encontrados para outros alimentos na literatura.

5. REFERÊNCIAS

- FURTADO, G de. F.; SILVA, F. S. da; PORTO, A. G.; SANTOS, P. dos. Secagem de polpa de ceriguela pelo método de camada de espuma. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v. 12, n. 1, p.9-14, 2010.
- KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, v.78, p.98-108, 2007.
- MCMINN, W. A. M.; & MAGEE, T. R. A. (1999). Principles, methods and applications of the convective drying of food stuffs. *Trans IChemE*, 77, 175-193.
- PRASAD, K., VAIRAGAR, P. R., BERA, M. B. Temperature dependente hydration kinetics of *Cicer arietinum* splits. *Food Research International*, v.43, n.2, p.483-488, 2010.
- RAJKUMAR, P. et al. Drying characteristics of foamedalphonso mango pulp in a continuous type foam mat dryer. *J. Food Eng.*, v. 79, p.1452-1459, 2007
- RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; JARÉN, C.; MOURE, A. J. Bean moisture diffusivity and drying kinetics: a comparison of the liquid diffusion model when taking into account and neglecting grain shrinkage. *Spanish Journal of Agricultural Research*, v.5, p.51-58, 2007.
- Zogzas, N. P.; Maroulis, Z. B.; Marinos-Kouris, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, v.14, p.2225-2253, 1996.