



Cinética de secagem de polpa de manga (*Mangifera indica* L.) em camada de espuma

Drying kinetics of mango pulp (Mangifera indica L.) in foam layer

Rafaela de Sousa Nobre¹, Georgiana Maria Vasconcelos Martins², Tiago da Nóbrega Albuquerque³, Francisca Jussandra Alves Vieira⁴, Maria Jakelline Clementino de Andrade⁵.

¹ Graduada em Engenharia de Alimentos, UFCG-CCTA, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal-PB. E-mail: raella.nobree@hotmail.com;

² Mestre em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG. E-mail: georgiana.82@gmail.com;

³ Mestre em Sistemas Agroindustriais, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal-PB. E-mail: tiagofernandes_pb@hotmail.com;

⁴ Graduado em Engenharia de Alimentos, UFCG-CCTA, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal-PB. E-mail: sandraalvesvieira1@gmail.com;

⁵ Graduado em Engenharia de Alimentos, UFCG-CCTA, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal-PB. E-mail: jakelllyne_andrade@hotmail.com.

RESUMO- O objetivo do trabalho foi avaliar a cinética de secagem da polpa da manga da marca Doce Mel[®] em camada de espuma. A polpa da manga foi elaborada mediante um planejamento experimental fatorial completo 2². A temperatura (50 a 70°C) e concentração de emulsificante (5,5 a 10 g) são as variáveis do processo. A cinética de secagem ocorreu em período de taxa decrescente. Os modelos matemáticos: Lewis, Henderson&Pabis, Logistic, Logaritmico e Aproximação da Difusão, ajustaram bem aos dados experimentais, o modelo Aproximação da difusão, apresentou coeficiente de determinação superior a 98,68% e DQM inferiores a 0,0306. Verificou-se influência da temperatura e da concentração de emulsificante na constante de cinética de secagem. De acordo com as constantes de secagem apresentadas pelo modelo Aproximação da Difusão, recomenda-se a secagem da polpa da manga nas seguintes condições: temperatura de 50°C e concentração de emulsificante de 5,5 g.

Palavras-chave: Camada de espuma. Modelagem matemática. Constante cinética.

ABSTRACT- This study aimed to evaluate the foam mat drying kinetics of Doce Mel[®] mango. The mango pulp was elaborated using a complete factorial experimental design 2². The process variables were the temperature (50 to 70°C) and emulsifier concentration (5,5 to 10 g). The kinetics of drying occurred in a period of decreasing rate. The mathematical models: Lewis, Henderson & Pabis, Logistic, Logarithmic and Diffusion approximation, fitted well to the experimental data. The Diffusion approximation model presented coefficient of determination higher than 98.68% and DQM lower than 0.0306. The influence of temperature and emulsifier concentration on the drying kinetic constant was verified in this study. According to the drying constants presented by the Diffusion Approach model, it is recommended to dry the mango under the following conditions: temperature of 50 °C and emulsifier concentration of 5,5 g.

Key words: Foam mat. Mathematical Models. Kinetic Constant.

*Autor para correspondência

Recebido para publicação em 13/05/2019; aprovado em 02/08/2019.

INTRODUÇÃO

A manga (*Mangifera indica L.*) se destaca entre as frutas tropicais de maior expressão econômica não só no mercado brasileiro, mas também internacional (Silva, et al 1999). É uma fruta com uma grande quantidade de polpa, possui sabor e aromas agradáveis, além de ser uma excelente fonte de carotenoides e carboidratos (Brandão, 2003). A manga está presente na dieta alimentar brasileira, sendo sua produção concentrada nas regiões Norte e Nordeste, onde as condições climáticas são favoráveis para o desenvolvimento da cultura com grande produtividade e qualidade.

As mangas em geral são consumidas na forma “in natura”, ou na forma de sucos, compotas, gelatinas, geleias e sorvetes (Cunha et al, 1994). A polpa de manga tem grande relevância como matéria prima, para produção de frutas em conservas, geleias, sorvetes, néctares e é utilizada entre as indústrias pelo motivo de poder ser adquiridas em várias épocas do ano, sendo de grande importância comercial. Ao mesmo tempo também são usadas por outras indústrias que utilizam a polpa de fruta para a fabricação de iogurtes, doces, biscoitos e alimentos infantis (Benevides et al, 2008).

A principal forma de comercialização de frutas se dá na forma de polpa congelada, apesar da sua grande aceitação comercial, esta forma de processamento e conservação implica em vários custos elevados de armazenamento e transporte (DANTAS, 2010). A utilização de polpa de frutas congeladas se justifica pela praticidade e disponibilidade em todas as épocas do ano, bem como a segurança e a qualidade proporcionadas pelo congelamento das mesmas, tendo em vista seu uso em diferentes processamentos como secagem que irá transformar a polpa em pó. A desidratação pelo método Foam mat, visa prologar a vida útil de prateleira, bem como promove a redução da atividade de água, além de reduzir o custo do transporte e armazenamento, devido à leveza e compactação, combinadas aos efeitos benéficos da estabilidade microbiológica e química dos alimentos (Fellows; Javier, 1994).

A desidratação via foam mat drying consiste em um processo de conservação, onde o material líquido ou semilíquido é transformado numa espuma estável, através de batidura e incorporação de ar ou outro gás, que é submetido à secagem com ar aquecido, até o ponto em que impeça o crescimento de microrganismos, reações químicas e/ou enzimáticas (Azizpour et al, 2016).

A secagem em leito de espuma é um método relativamente simples e barato, que se vale da utilização de agentes, que tem a finalidade de manter a espuma estável durante o processo. Dentre as vantagens deste método, destacam-se as menores temperaturas de desidratação e o menor tempo de secagem, devido à maior área de superfície exposta ao ar e à velocidade de secagem, acelerando o processo de remoção de água e a obtenção de um produto poroso e de fácil reidratação (Bastos et al, 2005).

A secagem em leito de espuma é uma técnica aplicada em muitos alimentos sensíveis ao calor, como os sucos de frutas. Os produtos obtidos são de boa qualidade e o processo tende a ser relativamente rápido. Vários

pesquisadores vêm aplicando essa técnica em vários produtos alimentícios (Muthukumaran, 2008).

A cinética da desidratação Foam mat da graviola foi estudada com objetivo de avaliar a modelagem matemática do processo em diferentes condições de ar de secagem. O modelo para determinar o binômio teor de água crítico e tempo crítico e o modelo matemático de Midilli e Kucuk se ajustaram bem aos dados experimentais da secagem e se obteve acréscimo no coeficiente de difusão efetiva com a elevação da temperatura de secagem e energia de ativação de 33,10 kJ/mol (Baptestini, 2015).

Por outro lado, avaliaram a desidratação Foam mat da batata yacón que foi modelada em termos da transferência de calor e massa e, em seguida, simulada em um software pelo Método dos Elementos Finitos. O modelo foi capaz de prever o processo de forma satisfatória e a técnica de secagem permitiu um leito de espuma para se obter o pó yacón de boa qualidade, que pode ser em várias formulações alimentares (Franco et al, 2015).

Finalmente, a desidratação por Foam mat da clara de ovo, utilizando como agente formador de espuma a metil celulose. Nesse estudo avaliaram o efeito da temperatura na qualidade do produto desidratado e verificaram que a temperatura de secagem de 65 °C, obteve a solubilidade máxima. Os teores de antocianinas, pH, índice de escurecimento e o tempo de secagem, diminuíram com o aumento da temperatura de secagem de 50 a 80°C (Abbasi; Azizpour, 2016).

Na literatura vários modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos, têm sido empregados para explicar o fenômeno de secagem. Esses são utilizados para se estimar o tempo de secagem de diferentes produtos e gerar as curvas de secagem (Midilli; Kucuk, 2003). Entre os modelos semi-teóricos e empíricos, Lewis, Logístico, Henderson&Pabis, Logarítmico e Aproximação da Difusão, têm sido frequentemente utilizados para a modelagem matemática da cinética de secagem de diversos produtos alimentícios: manga, banana e mandioca (Koua et al, 2009); manga (Goyalet et al, 2006), maçãs 'Fuji' e 'Gala' (Santos et al, 2011), banana (Silva et al, 2014; Santos, 2010), mamão (Udomkun et al, 2015) e graviola (Baptestini et al, 2015) e dentre outros.

Diante do exposto acima, o presente trabalho teve como objetivos, submeter a polpa de manga de marca conhecida no mercado, à secagem em leito de espuma (Foam mat drying), em diferentes condições de temperatura e concentração de emulsificantes, e assim caracterizar a secagem da polpa da manga, ajustar os diferentes modelos matemáticos as curvas de secagem, determinar a constante de secagem (k) e utilizar a metodologia do planejamento experimental na análise estatística da secagem da polpa de manga.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada nos Laboratórios de Sementes e Fisiologia Vegetal do Centro de Ciências e Tecnologia de Alimentos, CCTA da Universidade Federal de Campina Grande, Campus de Pombal, Pombal, Paraíba, Brasil.

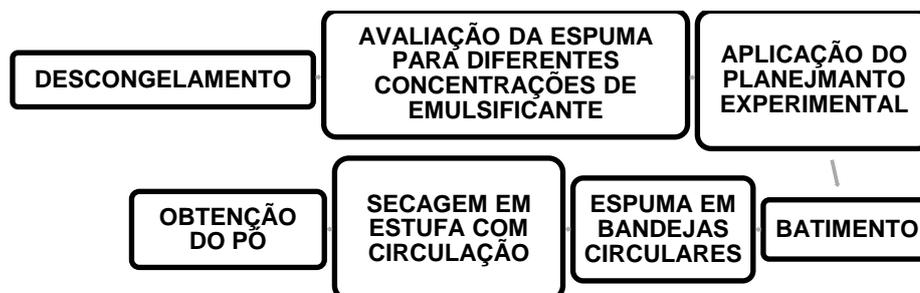
Cinética de secagem de polpa de manga (*Mangifera indica L.*) em camada de espuma

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizadas polpas de manga industrializadas da marca Doce Mel®, adquirida no comércio local da cidade de Pombal, em embalagens plásticas de 100 g, assim como emulsificante a base de sacarose, monoglicerídeo destilado, éster de glicerol, estereato de potássio em glicerol e

propileno glicol. As polpas foram mantidas sob congelamento até sua utilização e levadas de imediato para o Laboratório do Campus, onde os experimentos foram conduzidos.

Para o desenvolvimento do trabalho foi seguido o fluxograma experimental representado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do Processo de secagem em camada de espuma da polpa de manga de marca Doce Mel®



Foi utilizado um planejamento fatorial completo 2^2 , totalizando sete ensaios com três pontos centrais. Adotou-se como variáveis independentes, temperatura de secagem e concentração de emulsificante para avaliar sua influência sobre a resposta: constantes de secagem. Na Tabela 1 apresenta-se a matriz do planejamento adotado. Para a preparação das espumas a polpa da manga foi descongelada e pesada, adicionando-se o emulsificante nas

proporções estabelecidas no planejamento adotado. A mistura de polpa e emulsificante foi submetida à agitação por 30 minutos em batedeira doméstica Arno®, Modelo Facilita de 250 W, utilizando a velocidade máxima do equipamento. Em seguida as espumas foram colocadas em bandejas de alumínio circular de raio 4,55 cm para realização do processo de secagem

Tabela 1 - Matriz do Planejamento completo 2^2 para secagem em camada de espuma da polpa de manga

Ensaio	Temperatura Codificada	Concentração Codificada	Temperatura (°C)	Concentração de emulsificante (g)
1	-1	-1	50	5,5
2	+1	-1	70	5,5
3	-1	+1	50	10
4	+1	+1	70	10
5	0	0	60	7,7
6	0	0	60	7,7
7	0	0	60	7,7

As espumas da polpa da manga foram desidratadas em estufa com circulação forçada de ar marca Solab. A cinética de secagem foi estudada acompanhando a perda de água pela variação da massa do produto, ao longo da secagem, até que se observou massa constante, considerando-se o teor de água de equilíbrio dinâmico. O produto desidratado foi removido das bandejas, triturado

formando pó, o qual posteriormente foi acondicionado em sacos de polietileno até a realização das análises.

As pesagens das amostras foram realizadas utilizando uma balança semi analítica de Marca Bel®, com precisão de 0,001 g. A porcentagem de teor de água foi calculada em base úmida aplicando-se a Equação 1, sendo o resultado final expresso pela média aritmética das subamostras.

$$\text{Teor de água (\%)} = \frac{(M_i - M_f)}{(M_f - t)} \cdot 100$$

(1)

Em que: M_i é a massa inicial, massa da bandeja mais a massa da espuma úmida M_f é a massa final, massa da bandeja mais a massa da espuma seca; t é a tara, massa da bandeja.

As curvas de secagem foram obtidas pela conversão dos dados experimentais referentes à perda de

$$RX = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \quad (2)$$

Em que: RX é a razão de teor de água adimensional; X é a teor de água absoluta, X_o é a teor de água inicial, X_e é a teor de equilíbrio, bs .

água no parâmetro adimensional razão de teor de água (RX). Para determinação da razão de teor de água da polpa de manga para as diferentes condições de secagem foi utilizada a Equação 2.

Os dados experimentais da cinética de secagem foram ajustados por cinco equações que estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Modelos para prever a cinética de secagem da polpa da manga

Nome dos Modelos	Equação
Lewis	$RX = \exp(-k \cdot t)$ (3)
Logistic	$RX = \frac{a_o}{(1 - a) \cdot \exp(k \cdot t)}$ (4)
Henderson & Pabis	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$ (5)
Logarítmico	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$ (6)
Aproximação da Difusão	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$ (7)

Em que RX é a razão de teor de água (adimensional); a, a_o, b, c e k são as constantes dos parâmetros dos modelos matemáticos.

Os parâmetros dos modelos utilizados foram obtidos mediante aplicação dos dados experimentais ao pacote de análise utilizando-se análise de regressão não linear, pelo algorítmico de Gauss Newton, com 1000

iterações e critério de convergência 1×10^{-6} empregando-se o programa computacional Statistica 7.0®.

Como critério para análise da modelagem matemática da cinética de secagem da polpa da manga foram utilizados o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio quadrático médio (DQM), sendo calculados pelas Equações (8 a 9), respectivamente:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (RX_{i,pre} - RX_{i,exp})^2}{\sum_{i=1}^n (RX_{i,exp} - RX_{i,premean})^2} \quad (8)$$

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (RX_{i,pre} - RX_{i,exp})^2}{N}} \quad (9)$$

Análise estatística

Os resultados da variável de resposta (constante cinética k) em relação às variáveis de entrada (temperatura e concentração de emulsificante) para todas as condições

estabelecidas pelo planejamento adotado foram tratados por análise de regressão linear da metodologia de superfície de resposta, para extração dos modelos matemáticos codificados, e a análise de variância (ANOVA) foi aplicada para testar a adequação dos modelos matemáticos

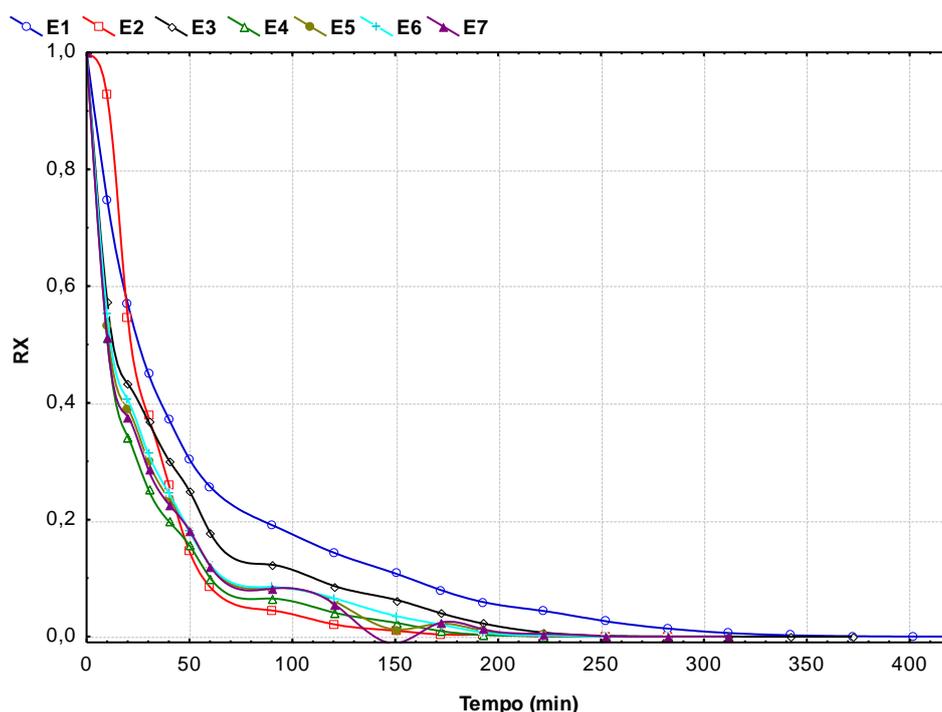
Cinética de secagem de polpa de manga (*Mangifera indica* L.) em camada de espuma

codificados, cuja significância estatística foi observada pelo teste F e pelo coeficiente de determinação (Neto et al, 2010).

A visualização dos efeitos das variáveis independentes (temperatura e concentração de emulsificante) e de suas interações sobre as respostas avaliadas, foi observada através da construção do gráfico de Pareto.

Em seguida, foi realizado o ajuste ao modelo de primeira ordem e a otimização das melhores condições de secagem pelo método Foam mat (Neto et al, 2010), considerando-se as melhores condições das variáveis independentes

Figura 2 - Curvas de secagem para as diferentes condições da matriz experimental. E1: T = 50°C, CE=5,5 g; E2: T = 70°C, CE =5,5 g; E3: T = 50°C, CE =10 g; E4: T = 70°C, CE = 10 g; E5: T = 60°C, CE = 7,7 g; E6: T = 60°C, CE = 7,7 g; E7: T = 60°C, CE = 7,7 g. Em que T é a temperatura de secagem e CE é a concentração de emulsificante.



Na Figura 2 estão apresentadas as curvas de secagem da razão do teor de água (RX) em função do tempo (min), onde as variáveis de entrada são a temperatura e a concentração de emulsificante. A perda de água que acontece durante a secagem é mais rápida no início do processo, visto que as curvas descerem rapidamente.

De acordo com o gráfico, quando se aumenta a temperatura, será reduzido o tempo de secagem, e as curvas adquirem uma inclinação maior, comprovando que ao se elevar a temperatura da estufa, há uma maior quantidade de calor transferido do ar para o material, assim aumentando a velocidade com que a polpa de manga é desidratada. O

(temperatura e concentração de emulsificante) e suas interações sobre a resposta (constante cinética), maximizando a resposta desejada e/ou minimizando a indesejada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta as curvas de secagem da polpa de manga em camada de espuma, apresentadas na forma adimensional do teor de água (RX) em função do tempo, para os sete ensaios da matriz experimental.

comportamento semelhante ao presente estudo foi observado durante a desidratação osmótica do mamão papaya em secador horizonte (Udomkun et al, 2015).

Utilizando a temperatura de 70° C (curvas E2 e E4 da Figura 2) observou-se que as amostras secaram mais rapidamente em relação às amostras submetidas as temperaturas de 50°C e 60°C (curvas E1, E3, E5, E6 e E7).

Apresenta-se na Tabela 3, o resumo do ajuste dos modelos por meio de regressão não linear aos dados experimentais de secagem de polpa de manga em camada de espuma, considerando-se as condições da matriz experimental apresentadas na Tabela 1.

Tabela 3 - Parâmetros estatísticos, coeficientes de determinação (R^2) e o desvio quadrático médio (DQM) dos modelos de secagem nas condições da matriz experimental.

Modelos/Parâmetros	Ensaio						
Lewis	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
k (min^{-1})	0,0192	0,0381	0,0192	0,0306	0,0293	0,0228	0,0274
R^2 (%)	94,87	98,33	97,46	98,95	99,08	92,41	97,68

DQM	0,0579	0,0347	0,0431	0,0288	0,0270	0,0733	0,0403
Henderson&Pabis	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
A	0,8810	0,9493	0,9188	0,9671	0,9706	0,9149	0,9432
k (min⁻¹)	0,0154	0,0359	0,0169	0,0294	0,0282	0,0201	0,0254
R²(%)	96,04	98,59	98,02	99,06	99,17	93,63	97,98
DQM	0,0509	0,0318	0,0381	0,0273	0,0258	0,0672	0,0377
Logarítmico	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
A	0,8782	0,9357	0,9109	0,9519	0,9584	0,9069	0,9271
k (min⁻¹)	0,0191	0,0387	0,0189	0,0318	0,0301	0,0216	0,0285
C	0,04282	0,0228	0,0281	0,0254	0,0208	0,0199	0,0332
R²(%)	97,42	98,95	98,55	99,43	99,43	95,91	98,8
DQM	0,0410	0,0275	0,0255	0,0212	0,0214	0,0538	0,0290
Aproximação da Difusão	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
A	0,5649	0,5205	0,4987	0,6724	0,6481	0,5835	0,6534
k (min⁻¹)	0,0490	0,0890	0,0478	0,0494	0,0477	0,0555	0,0512
B	0,1359	0,2548	0,1860	0,2548	0,2723	0,1293	0,1849
R²(%)	99,97	99,88	99,96	99,97	99,95	98,68	99,7
DQM	0,0044	0,0093	0,0054	0,0051	0,0065	0,0306	0,0046
Logistic	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
Ao	0,0051	0,0051	0,0024	0,0053	0,0045	0,0051	0,0046
k (min⁻¹)	0,0154	0,0359	0,0168	0,0294	0,0282	0,0201	0,0254
A	0,9946	0,9946	0,9974	0,9945	0,9954	0,9944	0,9951
R²(%)	96,04	98,59	98,02	99,06	99,17	93,63	97,98
DQM	0,0509	0,0318	0,0381	0,0273	0,0258	0,0672	0,0376

De acordo com os resultados da Tabela 3, pode-se observar que todos os modelos matemáticos Lewis, Henderson e Pabis, Logarítmico, Aproximação da Difusão e Logistic representaram bem os dados experimentais, porque os coeficientes de determinação foram superiores a 92% e os valores de DQM inferiores a 0,0733.

Conforme foi observado, verifica-se que o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais, considerando as variáveis de entrada que é a concentração de emulsificante e a temperatura foi o de Aproximação da difusão, pois apresentou coeficientes de determinação (R²) maiores que 98,68 %, e menores desvios quadráticos (DQM) inferiores a 0,0306. A superioridade do modelo da Aproximação da difusão, quando comparado aos outros modelos (Tabela 2), é explicado devido ao fato de a equação ter um maior número de parâmetros.

Resultados semelhantes foram encontrados em estudos de secagem utilizando banana em camadas finas, observou-se que os modelos de Midilli e Aproximação da difusão representaram de forma satisfatória, a descrição da cinética de secagem da farinha de banana verde com coeficientes de determinação superiores a 99% (Costa et al, 2015).

Ao avaliarem a influência de pré-tratamentos da banana variedade terra em diferentes temperaturas, relataram que os melhores coeficientes de determinação (R²), foram os ajustados ao modelo de Midilli e Kucuk e também apresentaram o menor erro médio estimado (Santos, 2010). De maneira semelhante ao estudarem a modelagem matemática da secagem em espuma da graviola verificou que o modelo de Midilli é eficiente para explicar o binômio teor de água crítico e tempo crítico, descrevendo então assim o fenômeno e sendo convincentes os resultados obtidos. Analisando o comportamento dos cinco modelos empregados, para o parâmetro k (min⁻¹), o seu valor aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem (Baptistini et al, 2015). Ao analisar a desidratação do mamão papaya resultados similares foram encontrados (Udomkun et al, 2015). Analisando a modelagem matemática da secagem da polpa de oiti, observou que os valores de k (min⁻¹) aumentam com o acréscimo da temperatura, o mesmo comportamento foi visto ao estudar a secagem da polpa de graviola pelo método Foam mat (Gurgel et al, 2014).

O Gráfico de Pareto ilustrado pela Figura 3, representa os efeitos principais das variáveis de processo na constante de secagem (k). Pode-se constatar que todos os

Cinética de secagem de polpa de manga (*Mangifera indica* L.) em camada de espuma

fatores apresentaram efeito significativo. Contudo, a da concentração de emulsificante (CE) sobre o parâmetro temperatura (T) foi a variável mais significativa, seguido k.

Figura 3 - Gráfico de Pareto para a constante de secagem (k) estimada pela modelo aproximação da difusão.

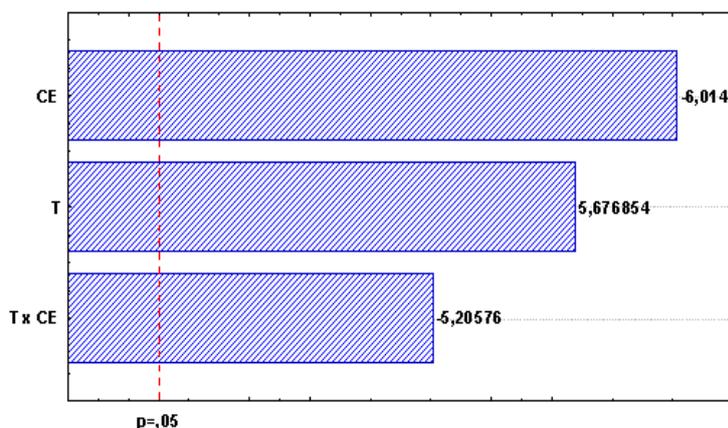


Tabela 4 - Estimativa do coeficiente de regressão e teste T sobre as respostas constantes cinéticas avaliada pelo modelo da aproximação da difusão.

Fatores	Coefficientes	Erro puro	Teste T	p-valor
Média	0,050911	0,001944	26,18713	0,001455*
Temperatura (T)	0,000373	0,000043	8,72903	0,012871*
Concentração de emulsificante (CE)	-0,000031	0,000043	-0,71754	0,547531
T x CE	-0,000004	0,000001	-5,20576	0,034976*
Coefficiente de determinação (R ²)	97,48			

*Significativo a $p \leq 0,05$.

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados dos fatores temperatura (T), concentração de emulsificante (CE) e das interações para a temperatura e concentração de emulsificante. Em relação a constante cinética k, todos os parâmetros lineares das duas variáveis, bem como suas

interações foram significativos ($p \leq 0,05$), com coeficiente de determinação superior a 97%.

A análise de variância (ANOVA) obtida para a constante cinética avaliada para o modelo da Aproximação Difusão está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Análise de variância (ANOVA) do modelo completo da tabela de regressão ($p \leq 0,05$) para a constante cinética avaliada pelo modelo Aproximação da Difusão

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de liberdade	Média Quadrática	F _{Calculado} ($p \leq 0,05$)	F _{tabelado} ($p \leq 0,05$)
Regressão	1,3081x10 ⁻³	2	6,5404 x10 ⁻⁴	77,32	6,94
Resíduos	3,3834 x10 ⁻⁵	4	8,4585x10 ⁻⁶		
Falta de Ajuste	0,000003	2	1,6473x10 ⁻⁶	0,11	19,00
Erro Puro	0,000031	2	1,5270x10 ⁻⁵		
Total	0,001342	6	6,7942x10 ⁻⁴		

O modelo de regressão gerado foi significativo ($p \leq 0,05$) porque o F_{calculado} (0,95; 2; 4) = 77,32 foi maior que o F_{tabelado} (0,95; 2; 2) = 6,94. Porém, a falta de ajuste não foi significativa pois o (F_{calculado} (0,95; 2; 2) = 0,11 < F_{tabelado} (0,95; 2; 2) = 19). As médias nos pontos centrais

foram muito próximas e o erro puro muito baixo, o modelo foi considerado válido para fins preditivos (Neto et al, 2010). Pelo teste F aplicado, o coeficiente de regressão significativo a 95% foi considerado o modelo matemático proposto para representar a Equação 10 (k é a constante

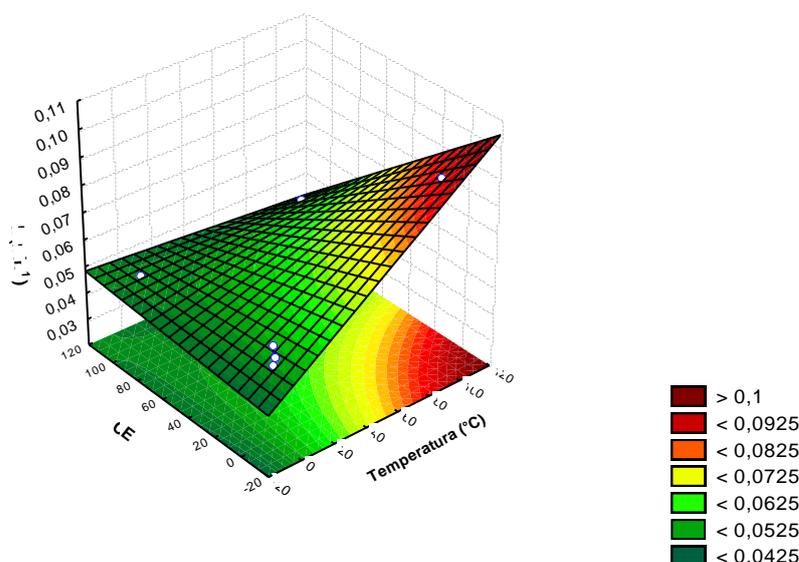
cinética), sendo possível estabelecer a superfície de resposta (Figura 4).

$$k = 0,050911 + 0,000373 \cdot T - 0,000031 \cdot CE - 0,000004 \cdot T \cdot CE \quad (10)$$

Observa-se na Figura 4 que a constante de secagem (k) foi diretamente proporcional ao aumento da temperatura de operação da estufa com circulação e ar forçada e diretamente proporcional a concentração de emulsificante, ou seja, o tempo necessário para que as

amostras atinjam o equilíbrio de umidade foi melhor quando se utilizou temperatura mais alta e que a concentração de emulsificante ajudou na perda de água, pois acelerou o processo de secagem.

Figura 4 - Superfície de resposta para os efeitos da Temperatura e Concentração de emulsificante em relação a constante de secagem (k).



CONCLUSÃO

Mediante os resultados apresentados pode-se concluir que o modelo matemático de Aproximação da Difusão representa satisfatoriamente os dados experimentais da secagem da polpa da manga com coeficientes de determinação superior a 98,68% e DQM inferiores a 0,0306.

A concentração de emulsificante das amostras e a temperatura de operação da estufa com circulação influenciaram significativamente ($p=0,05$) na constante de secagem, sendo a magnitude da mesma diretamente proporcional ao aumento da temperatura de operação da estufa com circulação e diretamente proporcional a concentração de emulsificante das amostras.

De acordo com as constantes de secagem apresentadas pelo modelo, recomenda-se a secagem da polpa da manga de marca Doce Mel®: temperatura de secagem 50°C e 5,5 g da concentração de emulsificante.

REFERÊNCIAS

Silva MF, Amaral CM, Carmo HCE, Maury P.M. **Estudos sobre mercado de frutas**. São Paulo: FIPE; 1999, 373.

Brandão MCC; Maia G A, Lima DP; Parente EJS; Campello CC; Nassu, RT; Feitosa T, Sousa PHM. Análise físico-química, microbiológica e sensorial de frutos de manga submetidos à desidratação osmótico-solar. *Revista Brasileira de Fruticultura*; 2003. 25 (1): 38-41.

Cunha GAP; Sampaio JMM; Nascimento AS; Santos Filho HP; Medina VM. Manga para exportação: aspectos técnicos da produção. **Publicações Técnicas FRUPEX** (Brasil). 1994. No.8. 35p.

Benevides SD, Ramos AM, Stringheta PC, Castro VC. Qualidade da manga e polpa da manga Ubá. *Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos*. Campinas; 2008. 28 (3): 571-578.

DANTAS SCM. **Desidratação de polpas de frutas pelo método foam- mat**. Dissertação de mestrado,

Cinética de secagem de polpa de manga (Mangifera indica L.) em camada de espuma

- Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal- RN. 2010. 100f.
- Fellows PST, Javier F. Tecnología del procesado de los alimentos: **Principios y prácticas**. Zaragoza (España), Acibia, S.A., 1994. p.549
- Azizpour M, Mohebbi M, Khodaparast MHH. Effects of foam-mat drying temperature on physico-chemical and microstructural properties of shrimp powder. **Innovative Food Science & Emerging Technologies** 2016; 34,122–126.
- Bastos DS, Soares DMBG, Araújo KGL, Bernardi MRV. Desidratação da polpa de manga Tommy Atkins utilizando a técnica de foam mat drying: avaliações químicas, físico-químicas e sensoriais. *Journal Food Technology*; 2005 8 (4): 283-290.
- Muthukumar A, Ratti C, Raghavan V.G.S. Foam-mat freeze drying of egg white – mathematical modeling part II: freeze drying and modeling. *Drying Technology*; 2008, (26): 13–518.
- Baptestini FM, Corrêa PC.; Junqueira MS, Ramos AM, Vanegas JDB, Costa CF. Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*; 2015, 19 (12), 1203–1208.
- Franco TS, Perusello CA, Ellendersen, LSN, Masson ML. Foam mat drying of yacon juice: Experimental analysis and computer simulation. **Journal of Food Engineering**; 2015, (158): 48–57.
- Abbasi E, Azizpour M. Evaluation of physicochemical properties of foam mat dried sour cherry. **Food Science and Technology**; 2016, (68): 105–110.
- Midilli A, Kucuk H. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. **Energy Conversion and Management**; 2003 44 (7):1111–1122.
- Koua KB, Fassinou WFF, Gbaha P, Toure S. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava. **Energy**; 2009, 34 (10):1594–1602.
- Goyal RK, Kingsly ARP, Mainkantan MR, ILYAS SM. Thin-layer Drying Kinetics of Raw Mango Slices. **Biosystems Engineering**, 2006, 95 (1): 43-49.
- Santos ES, Corrêa PC, Baptestini FM, Botelh FM, Magalhães FEA. Mathematical modeling of dehydration of ‘Fuji’ and ‘Gala’ apples slices using infrared. **Ciências e Tecnologia de Alimentos (Campinas)**, 2011, 31(3): 776-781.
- Silva WP, Silva CMDPS, Gama FJA, Gomes PG. Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**. 2014, 13 (1): 67–74.
- Santos P, Silva FS, Porto AG, Silva FTC, Furtado GF. Influência de pré-tratamentos na cinética de secagem em diferentes temperaturas de banana da variedade terra (Musa Sapientum, Linneo). **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial, Paraná**, 2010, 4 (2): 218-234.
- Udomkun P, Argyropoulos D, Nagle M, Busarakom M, Janjai S, Muller J. Single layer drying kinetics of papaya amidst vertical and horizontal airflow, **LWT - Food Science and Technology**, 2015, 64 (1): 67-73.
- Gurgel CEMR, Dieb JT, Machado IP, Dantas TNP, Medeiros MFD. Cinética de secagem da polpa de graviola pelo processo foam-mat. In: **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. 2014, p.6.
- Neto BB, Scarminio IS, Bruns RE. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas, Bookman Editora, 2010.
- Costa JD, Silva AS, Martins GMV. Cinética de secagem em camada fina da banana verde (Musa spp.). **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, 2015, 1(2): 4420-4427.
- Sousa FC, Sousa EP, Silva LMM, Martins JJA, Gomes JP, Rocha APT. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem de polpa de oiti. **Revista Educação Agrícola Superior**, Campina Grande, 2011, 26 (2):108-112.