

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA DIFUSIVIDADE EFETIVA E DO COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA DO ABACATE (Persia americana Mill.)

Suerda Bezerra Alves, suerdaufpb@yahoo.com.br¹
Márcia Ramos Luiz, marciarluiz@yahoo.com.br¹
Joselma Araújo de Amorim, joselmaaraujo@yahoo.com.br¹
Ânoar Abras El-Aouar, anoar@hs24.com.br²
José Maurício A. M. Gurgel, jm.gurgel@uol.com.br¹

¹Universidade Federal da Paraíba, LES / DEM / Brasil,

²Universidade Federal da Paraíba, DTQA / Brasil.

Resumo: A obtenção de biocombustíveis extraídos do abacate tem se mostrado bastante promissor pelo grande potencial de se obter tanto o biodiesel extraído da polpa como também o álcool retirado da semente. No entanto, a secagem do abacate se faz necessário como uma das etapas para produção de biodiesel que envolve a transferência de calor e massa que visa reduzir o teor de umidade para deixá-lo pronto para os outros processos envolvidos com a produção do biodiesel. Os modelos utilizados foram: Fick e Newton. As equações foram resolvidas pelo método dos mínimos quadrados. A Difusividade Efetiva de Massa e o Coeficiente Convectivo de Transferência de Massa foram determinados através da utilização de dados experimentais do teor de umidade obtida ao longo do processo. As condições estudadas no processo de secagem levam em consideração a velocidade do ar fixada em 3m/s e temperatura de 50°C. O modelo de Fick não teve um bom ajuste aos dados experimentais enquanto que o de Newton demonstrou ser capaz de prever a transferência de massa. O objetivo deste trabalho foi utilizar modelos matemáticos que simulem a transferência de calor e massa durante o processo de secagem.

Palavras-chave: secagem, abacate, difusividade, convectivo

1. INTRODUÇÃO

A maior parte de toda energia consumida no mundo é originada dos combustíveis fósseis derivados do petróleo. A crise do petróleo da década de 70 levou à busca de novas fontes de energia, cujo desafio principal era que o custo fosse compatível com o referencial imposto pelo petróleo (TEIXEIRA, 2005).

As fontes de energias renováveis são obtidas de várias formas, tais como: do sol, do vento, dos mares, da matéria orgânica, dentre outras. O Brasil em função de sua biodiversidade permite uma gama de possibilidades de oleaginosas que tem o potencial para a produção de biodiesel.

Pesquisou-se o abacate (*Persea Americana* Mill.) buscando novas fórmulas para o biodiesel. De sua polpa rica em gordura, é possível extrair o óleo e do caroço, o etanol. Da mistura, um biodiesel tão bom ou até melhor que o da soja, pois no caso da soja é preciso adicionar o etanol de cana-de-açúcar. Como também sua produtividade por hectare é bem maior, tornando-o mais barato (MANGINI, 2009).

A secagem é um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar. É uma das etapas de pré-processamento dos produtos agrícolas, cuja finalidade é retirar parte da água neles contida (TEIXEIRA, 2006). Para acelerar o processo de obtenção do óleo é necessário que tenha o abacate seco, pois o mesmo contém grande quantidade de água.

Os modelos matemáticos para a secagem de produtos biológicos são importantes, pois representa a diminuição do teor de umidade durante esse processo, permitindo assim caracterizar variáveis envolvidas nos processos de transferências de calor e massa que ocorrem. Estes levam em consideração o formato do produto, como também as condições do ar de secagem.

Para caracterizar a secagem interna do produto, faz-se necessário aplicar a Segunda Lei de Fick, a qual está baseada na retirada de umidade do interior para a superfície do produto. Enquanto que a Lei de Resfriamento de Newton está baseada na transferência de massa na superfície do produto.

Faz-se necessário ajustar as curvas de secagem para possibilitar a determinação dos coeficientes de transferência de massa. A técnica dos mínimos quadrados é freqüentemente usada em ajuste de curvas, pois a mesma procura retratar

melhor um conjunto de dados minimizando assim a soma dos quadrados das diferenças entre a curva ajustada e os dados.

Este trabalho tem por objetivo geral estudar a transferência de massa na secagem da fatia do abacate, utilizando-se para isto de modelos matemáticos para representar a diminuição do teor de umidade durante esse processo.

2. MODELOS MATEMÁTICOS

Pesquisadores como Panchariya et al. (2002) e Mwithiga e Olwa (2005) na busca de melhorar a qualidade do produto e otimização do processo utilizaram modelos matemáticos para descreverem a secagem de materiais biológicos, onde os mesmos são classificados de acordo com as transferências de calor e massa que ocorre nesse processo, de formas teórica e semi-teórica.

Para aplicação das duas formas de modelos matemáticos na secagem da fatia do abacate, faz-se necessário as seguintes condições:

$$\begin{array}{lll} \text{Condição inicial:} & t = 0; & 0 < Y < L; & X = X_0 \\ \text{Centro:} & t > 0; & Y = 0; & \frac{\partial X}{\partial t} = 0 \\ \text{Superfície:} & t = \infty; & Y = L; & X = X_{eq} \end{array}$$

2.1. Teórico

O modelo teórico além de empregar fundamentos de transferência de calor e massa, descreve o perfil de distribuição de água no interior do produto. Oliveira et al. (2006) relatam que a teoria difusional apoia-se exclusivamente na segunda Lei de Fick, que expressa que o fluxo de massa por unidade de área seja proporcional ao gradiente de concentração de água.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D_{ef} \nabla X) \quad (1)$$

Onde:

X: umidade no tempo (g/g)

D_{ef} : difusividade efetiva de massa (m^2/s)

t: tempo (s)

Para validar esse modelo, é necessário considerar as seguintes hipóteses:

- Difusividade efetiva de massa constante;
- Geometria como uma placa plana infinita de espessura L;
- O teor de umidade interna é unidirecional;
- Encolhimento do produto desprezado.

Resolvendo a Equação (1) por integração, obtém-se o perfil de umidade interna do produto, expressa em base seca, como é mostrado a seguir:

$$MR = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2} \right] \quad (2)$$

Onde:

MR: razão do teor de umidade

X: umidade no tempo (g/g)

X_0 : umidade inicial (g/g)

X_{eq} : umidade de equilíbrio (g/g)

D_{ef} : difusividade efetiva de massa (m^2/s)

L: comprimento característico, meia espessura da amostra (m)

t: tempo (s)

2.2. Semi-Teórico

As equações semi-teóricas têm como base a Lei de Resfriamento de Newton para transferência de calor por convecção, que é análogo para a transferência de massa, presumindo-se que, durante a secagem, as condições sejam isotérmicas e que a transferência de umidade seja restrita à superfície do produto (INCROPERA, 2006). Portanto, o período da taxa constante de secagem é representado por:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = h_m A (x - x_\infty) \quad (3)$$

Onde:

X: umidade no tempo (g/g)

t: tempo (s)

hm: coeficiente de convectivo de transferência de massa (m/s)

A: área superficial da amostra (m²)

(x - x_∞) : concentração de massa da amostra e do ar ambiente, respectivamente (g/m³)

Para validar esse modelo, é necessário considerar as seguintes hipóteses:

- Coeficiente Convectivo de Transferência de massa constante;
- Geometria como uma placa plana infinita de espessura L;
- O teor de umidade externo é unidirecional em y;
- Encolhimento do produto desprezado;

Integrando a Equação (3) obtém-se o perfil externo da concentração de umidade no tempo, expressa em teor de umidade em base seca, como é mostrada na Equação (4):

$$MR = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \text{Exp}(-t \cdot h_m \cdot A) \quad (4)$$

O Erro Relativo Médio (P) foi calculado através da Equação (5) a fim de avaliar se os modelos utilizados foram ou não preditivos (P<10%):

$$P = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{V_p - V_0}{V_0} \quad (5)$$

Onde:

P = desvio relativo médio (%)

V_p = valores preditos pelo modelo

V₀ = valores observados experimentalmente

N = número de pontos experimentais

3. MATÉRIA-PRIMA E METODOLOGIA

3.1. Matéria-prima

Para este trabalho foram utilizados abacates (*Persea Americana* Mill.) maduros da variedade quintal, adquiridos na feira do mercado central no Município de João Pessoa na Paraíba, oriundos do Município do Conde, do mesmo Estado.

As frutas foram selecionadas fornecendo amostras padronizadas de acordo com tamanho, formato, coloração e grau de maturação.

3.2. Metodologia

O procedimento foi realizado no Laboratório de Ciências e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal da Paraíba. Os frutos foram lavados, descascados por um fatiador manual e a fatia foi cortada em placas (5,0 x 4,0 cm) de 0,2cm de espessura, utilizando-se de uma faca de aço inoxidável.

A secagem convectiva foi realizada em um secador de leito fixo na temperatura de 50°C e velocidade do ar de secagem de 3,0m/s. A pesagem das amostras foi realizada a cada 15 minutos, até que o equilíbrio dinâmico entre as amostras e o ar de secagem fossem alcançadas.

O estudo da cinética de secagem convectiva foi realizado a partir dos dados adimensional de umidade em função do tempo do processo. Os modelos descritos pelas Equações (2) e (4) foram utilizados para ajustar os dados experimentais.

4. RESULTADOS

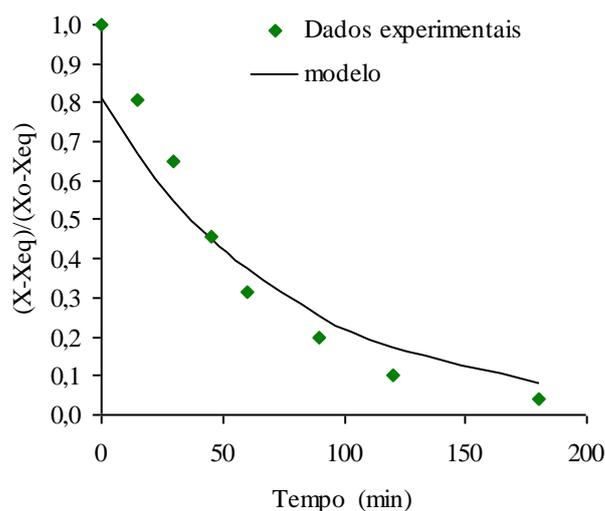
A determinação da Difusividade Efetiva de Massa (Def) foi calculada usando a metodologia de regressão não-linear pelo método dos mínimos quadrados de posse dos dados experimentais da cinética de secagem. A Tabela 1 mostra o ajuste do modelo difusional para a temperature de 50°C.

Tabela 1. Ajuste do modelo difusional para a amostra do abacate *in natura* para a temperatura de 50°C.

T ar (°C)	D_{ef} (m ² /s)	R ²	P (%)
50	$8,32 \times 10^{-11}$	0,9421	24,53

A Difusividade Efetiva de Massa obtida neste trabalho está de acordo com os resultados pesquisados na literatura para frutas em geral. O modelo de Fick utilizado neste trabalho não apresenta um bom ajuste aos dados experimentais obtidos através dos cálculos estatísticos, pois o valor de Erro Relativo Médio (P%) é superior ao valor de 10%, apesar de apresentar o Coeficiente de Correlação R² próximo de um.

O modelo difusional considerando a geometria de placa plana, foi utilizado para a modelagem da secagem como pode ser visto na Figura (1):

**Figura 1. Ajuste do modelo difusional a 50°C.**

A determinação do Coeficiente Convectivo de Transferência de Massa (h_m) também foi obtida através da metodologia de regressão não-linear de posse dos dados experimentais da cinética de secagem. A Tabela 2 mostra o valor para o Coeficiente Convectivo de Transferência de Massa (h_m), Coeficiente de Correlação (R²) e Erro Relativo Médio (P %) para a secagem da amostra do abacate *in natura* para 50°C.

Tabela 2. Ajuste do modelo convectivo para da amostra do abacate *in natura* na temperatura de 50°C.

T ar (°C)	$h_m \times 10^{-3}$ (m/s)	R ²	P (%)
50	5,78	0,9948	5,96

O Coeficiente Convectivo de Transferência de Massa obtido encontra-se dentro da literatura pesquisada. O modelo de Resfriamento de Newton apresenta um bom ajuste aos dados experimentais obtidos através dos cálculos estatísticos, sendo o valor de Erro Relativo Médio (P%) inferior ao valor de 10% e o Coeficiente de Correlação R² próximo de um.

O Gráfico do parâmetro em função da temperatura foi plotado a fim de examinar a dependência do modelo convectivo representado pela Lei de Resfriamento de Newton com o experimental. Como mostra na Figura (2).

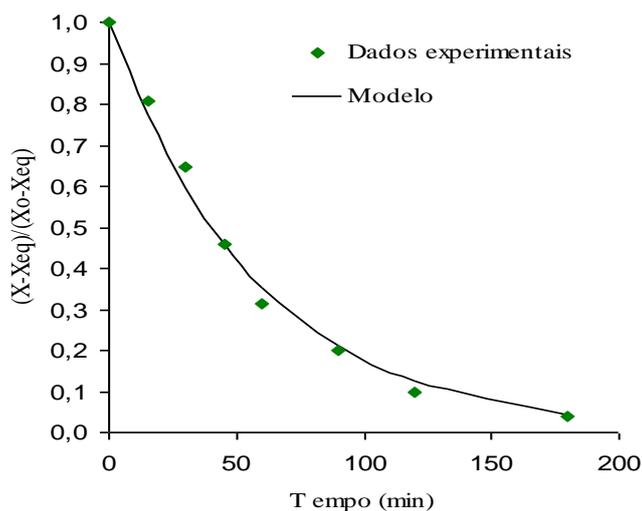


Figura 2. Ajuste do modelo convectivo a 50°C.

5. CONCLUSÃO

O modelo difusional representado pela Lei de Fick não foi capaz de prever o comportamento interno da perda de massa para a amostra do abacate *in natura*. Já o modelo de Newton obteve bons ajustes através dos dados estatísticos representados pelo Erro Relativo Médio para a temperatura de 50°C, sendo inferior a 10%, como também o Coeficiente de Correlação próximo de um. Logo este modelo convectivo pode ser usado para a predição da transferência de massa na superfície do produto, nas condições utilizadas nesse estudo.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro dado pelo CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

7. REFERÊNCIAS

- Incropera, F.P. Dewitt, D.P., 2003, “Fundamentos de transferência de calor e de massa” 5ª edição. Rio de Janeiro, Brasil.
- Mangine, J., 2009, “Biodiesel do Abacate, Fruta pode ser nova alternativa para a produção de biocombustível”. Disponível em: http://www.webmotors.com.br/wmpublicador/EcoNews_Conteudo.vxlpub?hmid=42315. Acesado em setembro de 2009.
- Mwithiga, G.; Olwal, J. O., 2005, “The drying kinetics of kale (Brassica oleracea) in a convective hot air dryer” *Journal of Food Engineering* Vol. 71, pp. 373–378.
- Oliveira, R., Oliveira, W. Park, K. J., 2006, “Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória” *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, São Paulo, Brasil, Vol. 26, n.1, pp.181-189.
- Panchariya, P. C., Popovic, D., and Sharma, A. L., 2002, “Thin-layer modelling of black tea drying process”, *Journal of Food Engineering*, Vol 52, pp. 349–357.
- Teixeira, C. A., 2006, “Avaliação Energética e de custos em unidades armazenadoras”. Tese de Doutorado. Minas Gerais, Brasil, 23 p.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE EFFECTIVE DIFFUSIVITY AND THE CONVECTIVE MASS TRANSFER OF AVOCADO (*Persia americana Mill.*)

Suerda Bezerra Alves, suerdaufpb@yahoo.com.br¹

Márcia Ramos Luiz, marciarluiz@yahoo.com.br¹

Joselma Araújo de Amorim, joselmaaraujo@yahoo.com.br¹

Ânoar Abras El-Aouar, anoar@hs24.com.br²

José Maurício A. M. Gurgel, jm.gurgel@uol.com.br¹

¹Universidade Federal da Paraíba, LES / DEM / Brasil,

²Universidade Federal da Paraíba, DTQA / Brasil.

Abstract: *The production of biofuels extracted from avocado enough showed commitment to the great potential to obtain both biodiesel extracted from the pulp as well as the alcohol removed from the seed. However, the drying of the avocado is necessary as a stage in the production of biodiesel involves the transfer of heat and mass to reduce the moisture content to be ready for the other processes involved in biodiesel production. The models used were Fick and Newton. The equations were solved by of least squares minimums method. The effective mass diffusivity and the Convective Coefficient of Transference of Mass were determined by using experimental data of moisture content obtained through the process. The conditions studied in the drying process takes in consideration the air speed settled in 3m/s and temperature of 50°C. The model of Fick did not have a good one fit to the experimental data whereas of Newton it demonstrated to be capable to predict the mass transference. The objective of this study was to use mathematical models that simulate the heat transfer and mass during the drying process.*

Palavras-chave: drying, avocado, diffusivity, convective.