

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE MODELOS DIFUSIVOS NA SECAGEM DE PIMENTA-DO-REINO PRETA (*Piper nigrum* L.)

D.A.S.ALVES, H. PERAZZINI, F. B. FREIRE e J.T. FREIRE

Universidade Federal de São Carlos / Departamento de Engenharia Química

E-mail para contato: freire@ufscar.br

RESUMO – A pimenta do reino preta é a mais importante especiaria comercializada mundialmente, sendo o Brasil um dos maiores produtores. Mesmo assim, poucos estudos para otimização do processo produtivo dessa *commodity* foram realizados. O objetivo desse trabalho foi realizar a caracterização da pimenta do reino e analisar a cinética de secagem. Com umidades variadas, mediram-se as dimensões lineares (diâmetro de Sauter e diâmetro médio), da área superficial, volume, esfericidade, e ainda a massa específica aparente e porosidade dos grãos. Os experimentos de cinética de secagem foram realizados em camada fina, em um secador de convecção forçada com temperatura variando de 50 a 70°C, e com velocidade do ar de 2,0 e 4,0 m/s. Com esses dados, fizeram-se ajustes das equações de Lewis, Page e Overhults, e do modelo Difusivo com hipóteses simplificadoras para a difusividade. Os resultados obtidos mostram que o modelo difusivo foi o mais adequado.

1. INTRODUÇÃO

A pimenta-do-reino é originária da Índia e, desde a década de 1930, quando foi introduzida no Brasil, por imigrantes japoneses, tem sido o suporte econômico de pequenos e grandes produtores da Região Amazônica (CHU, 2006). O Brasil é o segundo maior exportador mundial dessa *commodity*, tendo os estados do Pará, Espírito Santo, Bahia, Paraíba e Maranhão como os maiores produtores nacionais, respectivamente (IBGE, 2013). Dependendo do processamento, a pimenta-do-reino pode ser manufaturada nas colorações verde, branca e preta, sendo a última resultado da colheita do fruto totalmente desenvolvido e posteriormente seco (CHU, 2006). Dentre as etapas do processo produtivo, a secagem do material é fundamental para garantir a qualidade ao produto, diminuir a incidência de doenças e pragas, e auxiliar no processo de armazenamento e distribuição. (RAVINDRAN, 2000)

A secagem de pimenta-do-reino em território brasileiro ocorre em sua maioria de duas maneiras distintas, utilizando secadores mecânicos ou secagem ao sol, sendo que em ambas as perdas são significativas. A escassez de trabalhos na literatura sobre a pimenta-do-reino, e mais especificamente sobre a secagem dessa especiaria aumenta a motivação por essa pesquisa.

O objetivo desse trabalho foi caracterizar os grãos de pimenta-do-reino e analisar o ajuste dos

modelos de Page, Lewis, Overhults e Difusivo aos dados experimentais de curvas de secagem de pimenta-do-reino, e analisar também, a influência da temperatura e velocidade do ar no processo de secagem dos grãos de *Piper Nigrum* L.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Material

A pimenta-do-reino (*Piper Nigrum* L.) utilizada foi fornecida pela empresa Sacconi Comércio Exportação e Beneficiamento de Produtos Agrícolas Ltda., situada ao norte do estado do Espírito Santo, na cidade de São Mateus.

2.2. Métodos

Peneiramento: Para a análise granulométrica empregou-se a técnica do peneiramento agitado utilizando o agitador da marca Retsch AS 200 control, a fim de se classificar uma massa conhecida de grãos utilizando peneiras com aberturas de diâmetro médio (D_i) 3,35 mm; 4,76 mm; 4 mm e 3,35 mm da marca Tyler. Através da massa de sementes retidas em cada peneira calculou-se o diâmetro de Sauter (\bar{D}) de acordo com a equação 1 (FUMAGALLI, 2007).

$$\bar{D} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n x_i / D_i} \quad (1)$$

Análise de Imagens: As imagens dos grãos de pimenta-do-reino foram obtidas com uma câmera digital Sony Cibershot DSC-WX50, com definição de 16,2 megapixels. Os grãos foram distribuídos sobre uma folha de papel milimetrado, distantes o suficiente para a análise. As imagens foram tiradas em triplicata em vários instantes do processo de secagem dos grãos estudados. Utilizou-se o software Image Pro Plus 6 para a análise das imagens, utilizando a distância de 1 cm como gabarito, para conversão de pixels em centímetros. As características do material determinadas pelo software foram o diâmetro médio (B), comprimento (L), largura (W) e espessura (T). Através dos dados obtidos, foi possível calcular o volume (V), área superficial (S), e esfericidade (ϕ) (MOHSENIN, 1986), respectivamente pelas equações 2,3 e 4.

$$V = \frac{\pi \cdot B^2 \cdot L^2}{6(2L - B)} \quad (2) \quad S \approx \frac{\pi \cdot B \cdot L^2}{2L - B} \quad \phi = \frac{\sqrt[3]{W \cdot T \cdot L}}{L}$$

Densidade de Bulk: A densidade de bulk (ρ_b), ou volumétrica, é dada pela relação entre a massa (m) e o volume do leito empacotado (V_b). Foram realizados ensaios em triplicata com auxílio de uma proveta de 250 ml. A amostra de partículas foi empacotada no leito com auxílio de um funil para derramar as sementes no interior do recipiente (PEREIRA, 2010). Para melhorar a acomodação dos grãos, algumas batidas na base do leito proveta foram efetuadas (ZOTIN, 1985). Através da razão entre massa de partículas e o volume da proveta foi possível determinar a densidade de *bulk* pela

equação 5.

$$\rho_b = \frac{m}{V_b} \quad (5)$$

Através desses valores é possível calcular a porosidade do leito (ε_b), que é dada pela relação entre o volume de vazios entre as partículas e o volume total do leito e se relaciona com a densidade de *bulk* e massa específica aparente (ρ_{ap}) pela equação 6.

$$\varepsilon_b = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_{ap}} \quad (6)$$

Picnometria: Para determinar a massa específica aparente (ρ_{ap}), foi utilizada a técnica de picnometria líquida, utilizando tolueno, de acordo com a metodologia da Association of Official Analytical Chemists, AOAC (2000), sendo obtidos a massa (m) e volume dos grãos (V_{ap}), determinando em seguida a massa específica aparente da pimenta-do-reino. Foram realizados quatro réplicas em cada ensaio.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V_{ap}} \quad (7)$$

Secagem em Camada Fina: O equipamento utilizado é apresentado com detalhes em Perazzini *et. al.* (2012). A pimenta-do-reino preencheu a célula de medida com diâmetro de 0,10m e altura de 0,01m. O secador de convecção forçada foi ligado com uma célula idêntica acoplada, com o intuito de atingir o regime permanente (temperatura e vazão do ar constantes), sendo que, ao ser atingido, essa célula era substituída rapidamente pela célula contendo a amostra. O sistema permaneceu sob condições operacionais constantes de vazão e temperatura do ar de secagem. Neste trabalho serão apresentados apenas os dados de 50°C, uma temperatura intermediária de 60°C e uma temperatura máxima de 70°C. Para a velocidade do ar, testes iniciais indicaram que a velocidade do ar tinha pouca influência sobre a secagem, dessa maneira, foram escolhidos valores bem diferenciados de velocidade, sendo o valor mínimo de 2,0 m/s e máximo de 4,0 m/s. A célula de secagem preenchida com a amostra foi pesada em intervalos de tempo pré-determinados em uma balança analítica da marca GEHAKA modelo BG400 com precisão de 0.001g. Após a pesagem, a célula era rapidamente acoplada ao secador, sendo esse procedimento realizado até que a massa entre duas amostragens fosse praticamente constante. Aos dados experimentais obtidos, ajustou-se os modelos de Page, Lewis, Overhults e Difusivo (através do software Matlab 7). Foram utilizados parâmetros estatísticos para análise de adequação dos modelos aos dados experimentais. Utilizou-se o software para calcular os valores da difusividade efetiva (D_{ef}). A obtenção desse parâmetro é mostrada em detalhes em Perazzini *et. al.* (2012).

3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Peneiramento

Os dados obtidos no experimento de peneiramento agitado estão apresentados no gráfico da figura 1.

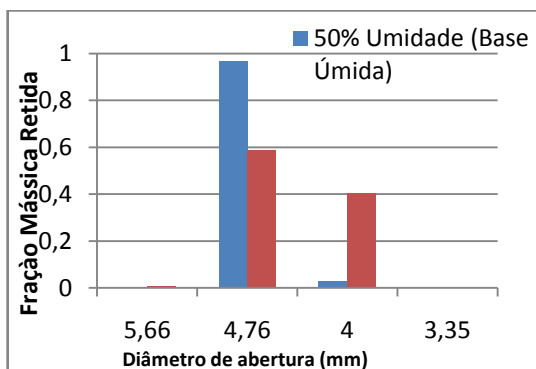


Figura 1- Fração mássica dos grãos retidos nas peneiras

De posse de tais dados, foi possível obter os dados do diâmetro de Sauter para as umidades de 10% e 50% em base úmida, respectivamente 4,42 mm e 4,73 mm.

3.2. Análise de Imagens

Os dados podem ser observados na figura 2.

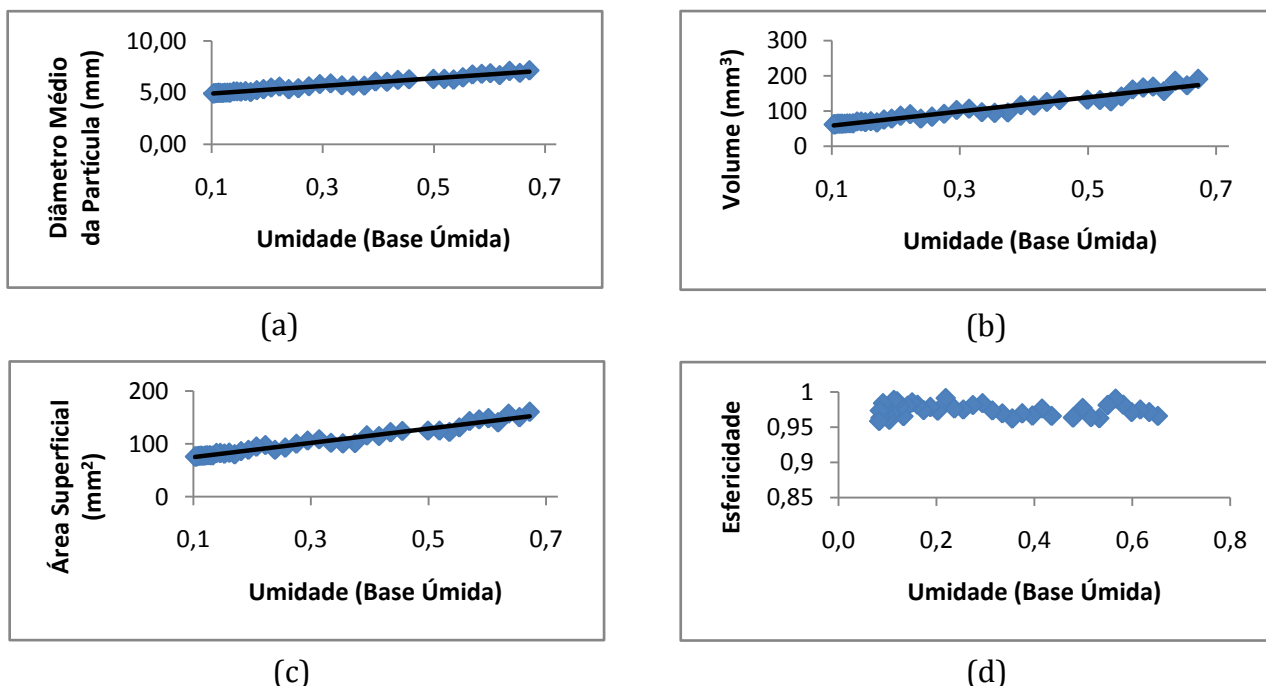


Figura 2—Características da pimenta do reino durante a secagem: (a) Diâmetro médio; (b) Volume; (c) Área Superficial; (d) Esfericidade.

Durante a secagem, em intervalos de 30 min, amostras de 20 grãos era retiradas e através da

análise de imagens, empregando as equações de 2 a 4, obteve-se a área superficial, volume e esfericidade da pimenta-do-reino preta, variando a umidade (Base úmida) de 8% a 65%. Pode-se observar que o diâmetro médio, o volume e a área superficial diminuíram com a redução da umidade em comportamento aproximadamente linear. Constatou-se que a esfericidade não obteve alteração significativa com a redução da umidade dos grãos como era esperado, mantendo a geometria esférica durante a secagem.

3.3. Medidas de Densidade

Após a realização dos experimentos de picnometria líquida em tolueno e testes em proveta, e posterior tratamento dos dados, obteve-se valores das densidades e porosidades do leito e da partícula, observados na tabela 1

Tabela 1 -Características físicas determinadas pelas medidas de densidade da partícula e do leito.

Parâmetro	10% Umidade (Base Úmida)	55% Umidade (Base Úmida)
ρ_{ap} (g/cm ³)	0,95	1,05
ρ_b (g/cm ³)	0,62	0,70
ε_b	0,35	0,34

Para a variação de umidade de 10% a 55% (Base Úmida), a densidade aparente e de *bulk* variaram pouco. O mesmo observou-se para a porosidade do leito.

3.4. Secagem em Camada Fina

Na figura 3a estão apresentadas as curvas experimentais de secagem da pimenta-do-reino preta, na faixa de temperatura de 50 a 70°C. Pode-se observar, pela figura 3a, que nos primeiros 100 minutos de experimento, a temperatura não exerce influência significativa na secagem. Isso se deve ao fato da água retirada nestes instantes ser fracamente ligada ao substrato. Dessa forma, pequenas quantidades de energia são suficientes para a retirada da água do material. A partir de tal tempo, pode-se claramente observar que o tempo de secagem é menor para a temperatura de 70°C, intermediário para 60°C e maior para 50°C, ou seja, com o aumento da temperatura ocorreu diminuição do tempo de secagem, isto porque, com o aumento de T, foi fornecida mais energia térmica ao processo. A cinética de secagem da pimenta-do-reino preta apresenta as mesmas características da maioria dos grãos agrícolas (ALMEIDA *et al.*, 2009), ou seja, existe uma clara dependência da velocidade da secagem com a temperatura do ar. Segundo Peske *et al.* (2003), a utilização de temperaturas elevadas permite uma secagem mais rápida, porém, pode provocar diferença de teor de água entre a periferia e o centro da semente, gerando um gradiente de pressão possível de causar danificação mecânica.

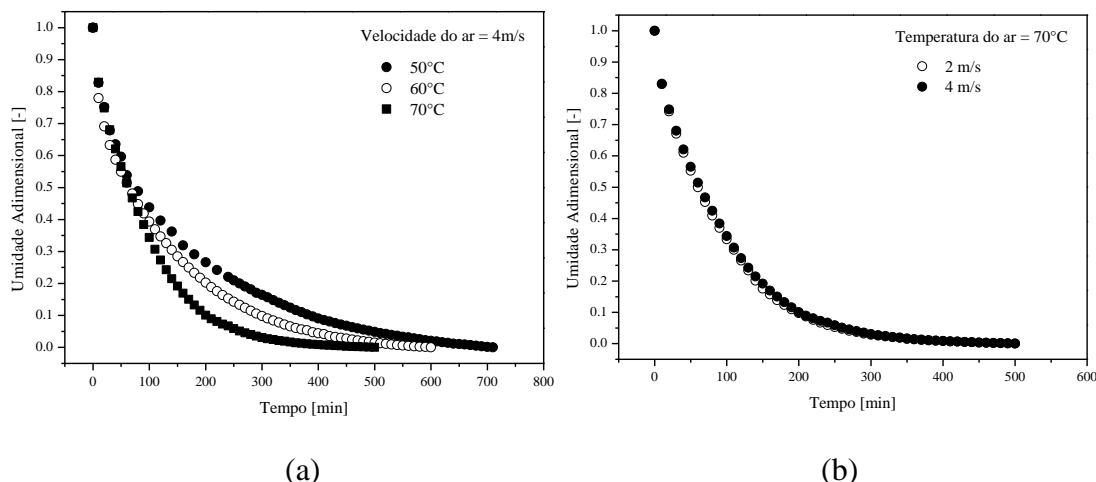


Figura 3—(a) Umidade adimensional em função do tempo para temperaturas de 50, 60 e 70°C. (b) Umidade Adimensional durante a secagem de pimenta-do-reino preta para temperatura de 70°C, a velocidade de 2 m/s e 4 m/s.

A Figura 3b apresenta os dados de umidade adimensional (UA) em função do tempo de secagem, numa mesma temperatura (70°C), para velocidade do ar de 2 m/s e 4 m/s. De forma visual, observa-se que a velocidade do ar não exerce influência significativa no processo de secagem. Este efeito sugere que a resistência externa não influencia nas condições de operações utilizadas e que o controle da secagem da pimenta-do-reino depende da difusão interna de umidade nesse grão.

3.5. Ajuste de Modelos

Aos dados experimentais de secagem foram ajustados os modelos de Page, Lewis e Overhults e o Difusivo, podendo ser visualizados na figura 5. Os modelos estão apresentados em inúmeros trabalhos existentes na literatura, como por exemplo em Madamba et al (1996), Pereira (2010) e Perazzini et al (2012). Os resultados obtidos para as equações analisadas, sendo R^2 o coeficiente de correlação e SE o erro médio estimado, foram, respectivamente: Lewis (0,9967 e 1,0816), Page (0,9986 e 0,0073); Overhults (0,9971 e 0,0069) e Difusivo (0,9905 e 0,0000003).

Todos os modelos apresentaram ajustes satisfatórios à secagem de pimenta-do-reino, que forneceram resultados para os coeficientes de determinação superiores a 0,99. Madamba et al. (1996) ressaltam que o coeficiente de determinação (R^2), isolado, não é capaz de determinar satisfatoriamente o melhor modelo, sendo necessário analisar outros coeficientes. Sendo assim, o modelo Difusivo obteve, além do valor de R^2 próximo da unidade, o menor valor do erro médio estimado, sendo o mais adequado nos ajustes aos dados experimentais.

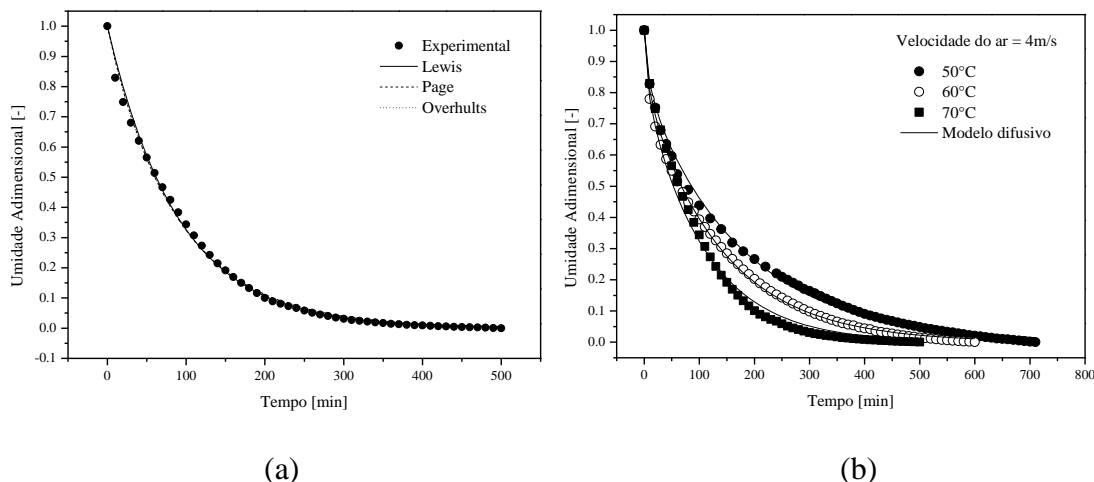


Figura 5 –(a) Umidade Adimensional durante a secagem de pimenta-do-reino preta e ajuste das equações de Lewis, Page e Overhults. (b) Umidade Adimensional durante a secagem de pimenta-do-reino preta e ajuste do Modelo Difusivo.

Na figura 5b, o modelo difusivo foi ajustado aos pontos experimentais de secagem. Pode-se observar também visualmente, além do R^2 e do SE, que o ajuste do modelo foi satisfatório para as temperaturas de 50, 60 e 70°C. Como esperado, os valores do coeficiente de difusividade efetiva determinados pelo modelo difusivo aumentaram com o aumento da temperatura. Tais valores são verificados na Tabela 2.

Tabela 2- Valores da Difusividade Efetiva para a faixa de temperatura de secagem

T(°C)	$D_{ef}(m^2/min)$
50	$5,71 \times 10^{-8}$
60	$7,28 \times 10^{-8}$
70	$9,30 \times 10^{-8}$

4. CONCLUSÃO

Nos ensaios de caracterização, constatou-se que o diâmetro médio, área superficial, perímetro e volume diminuem durante a secagem da pimenta-do-reino de forma linear, com encolhimento significativo do grão. Constatou-se também que a esfericidade não se altera com a variação do teor de umidade, mantendo a geometria esférica do grão.

Com base nos resultados obtidos, observa-se que nos 100 primeiros minutos a secagem não foi significativamente influenciada pela temperatura. A partir desse instante, a influência da temperatura foi muito significativa e a velocidade do ar de secagem não obteve influência relevante. Conclui-se assim que o mecanismo que controla a secagem é a difusão interna.

Como esperado, os valores da difusividade efetiva obtidos aumentaram com o aumento da temperatura do ar de secagem de $5,71 \times 10^{-8} m^2/min$ a 50°C para $9,30 \times 10^{-8} m^2/min$ a 70°C.

Através de análise estatística, todos os modelos ajustados obtiveram ajustes significativos na cinética de secagem. Dentre eles, o modelo Difusivo forneceu melhor ajuste aos dados experimentais.

6. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. P.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C.; SALES, J. F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). *Global Science and Technology*, v.2, p.72-83. 2009.
- AOAC. Official Methods of Analysis of AOAC Intl, 17th ed. Arlington, VA, USA: Association of official Analytical Communities. 2000.
- CHU, E. Y., et al. *A cultura da pimenta do reino*. Brasília: EMBRAPA: 2.ed., 2006.
- FUMAGALLI, F. *Estudo da secagem das sementes de Brachiarabrizantha*. 2007. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – UFSCar, São Carlos, 2007.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Levantamento Sistemático da Produção Agrícola: Pesquisa Mensal de Previsão e Acompanhamento das Safras Agrícolas no Ano Civil*. Rio de Janeiro: IBGE, v.26 n.1 p.1-83. Janeiro. 2013.
- MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The thin layer drying characteristic of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, v.29, p.75-97, 1996.
- MOHSENIN, N. N. Physical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach Publishers. 841 p., 1986.
- Perazzini, H. ; FREIRE, Fábio Bentes ; FREIRE, J. T. . Secagem de resíduos cítricos em camada delgada: estudo da difusão de umidade. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ), 2012, Búzios-RJ. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química. São Carlos-SP: Editora Cubo, 2012.
- PEREIRA, A.V. *Caracterização e secagem de sementes de painço (Setaria italica L.)* 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – São Carlos, UFSCar, 2010.
- PESKE, S. T.; VILLELA, F. Secagem de sementes. In: PESKE, S. T.; ROSENTHAL, M.; ROTA, G. R. M. *Sementes: Fundamentos científicos e tecnológicos*. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária (UFPel). p.283-322. 2003.
- RAVINDRAN, P. N.; et al. *Indian J. Arecanut Spices and Medicinal Plants*. v. 2, p. 71-78, 2000.
- ZOTIN, F.M.Z. *O efeito de parede em colunas de recheio*. 1985. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – São Carlos, UFSCar, 1985.