

ESTUDO TEÓRICO DA VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO EFETIVA COM A CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DOS FRUTOS DE CAFÉ DURANTE A SECAGEM

Fernanda Machado Baptestini¹; Paulo Cesar Côrrea²; Davi de Sousa Lima Vasconcellos³; Maycon Fagundes Teixeira Reis⁴; Thaiana Tássia Guimaraes⁵

¹ Eng. Agrícola, Mestranda DEA-UFV, Viçosa – MG, fernanda.baptestini@ufv.br

² Eng. Agrônomo, DS., Professor Adjunto do DEA-UFV, Viçosa – MG, copace@ufv.br

³ Graduando em Eng. Agrícola e Ambiental, DEA-UFV, Viçosa – MG, davi.vasconcellos@ufv.br

⁴ Eng. de Alimentos, Doutorando DEA-UFV, Viçosa – MG, maycon.reis@ufv.br

⁵ Graduanda em Eng. de Alimentos, DTA-UFV, Viçosa – MG, thaiana.guimaraes@ufv.br

RESUMO: Dentre os métodos de controle e manutenção da qualidade dos produtos agrícolas a secagem é largamente utilizada e o seu estudo teórico é extremamente importante sob os aspectos de engenharia e análise de processos. O presente estudo objetivou verificar a influência da contração volumétrica e da forma geométrica na determinação do coeficiente de difusão efetiva durante a secagem de frutos de café. Foram utilizados frutos de café (*Coffea arabica* L.), cultivar Catuaí Amarelo, colhidos manualmente com teor inicial de água de 1,25 (b.s.) e submetidos à secagem em três diferentes condições de temperatura e umidade relativa (35 °C e 32,1%; 45 °C e 15,7%; e 55 °C e 10,2%), até atingirem o teor médio de 0,13(b.s.). A Segunda Lei de Fick foi utilizada para obter os coeficientes de difusão dos frutos de café por meio da cinética da secagem considerando e negligenciando a contração volumétrica, assim como a forma geométrica do produto. Concluiu-se que a contração volumétrica e a forma geométrica influenciam na determinação do coeficiente de difusão, e que no modelo da difusão líquida estes devem ser incluídos para melhor compreensão da movimentação da água nos frutos de café.

Palavras-chave: Qualidade, coeficiente de difusão, secagem, contração volumétrica.

THEORETICAL STUDY OF EFFECTIVE DIFFUSION COEFFICIENTS VARIATION WITH THE VOLUMETRIC SHRINKAGE OF COFFEE FRUITS DURING DRYING

ABSTRACT: Among the methods of controlling and maintaining the quality of agricultural products, drying is widely used and its theoretical study is extremely important from engineering aspects and process analysis. The present study aimed to verify the influence of volumetric shrinkage and geometric shape in determining the the effective diffusion coefficient during drying of coffee fruits. Coffee fruits (*Coffea arabica* L.), variety Catuaí Amarelo, manually harvested, were utilized, with a initial moisture of 1,25 (dry base). These fruits were subjected to drying using three different temperature and relative humidity conditions (35 °C and 32,1%; 45 °C and 15,7%; and 55 °C and 10,2%), until it reaches the average moisture of 0,13 (dry base). The Fick's Second Law was used to obtain the diffusion coefficients of coffee fruits by drying kinetics considering and neglecting the volumetric shrinkage of the product. It was concluded that the volumetric shrinkage and geometric shape have influence on determining diffusion coefficients, and that in the liquid diffusion model it should be included for a better understanding of water movement in coffee fruits.

Key words: Quality, diffusion coefficient, drying, volumetric shrinkage

INTRODUÇÃO

Informações do processo de secagem dos produtos agrícolas tropicais são de primordial importância para dimensionamento ou aperfeiçoamento de equipamentos dessa operação unitária e consequentemente, a garantia de produtos de qualidade. No entanto, existem algumas limitações quanto aos estudos teóricos a respeito de alguns fenômenos que ocorrem, principalmente quanto à contração volumétrica dos produtos, quando submetidos à secagem. Brooker et al. (1992), relatam que a maioria dos modelos empregados para representar a secagem dos produtos agrícolas foi desenvolvido, negligenciando-se a importância da contração volumétrica do produto durante o processo de desidratação.

Segundo Mayor e Sereno (2004), a perda de água causa danos à estrutura celular do produto, levando à mudança na forma e no decréscimo em suas dimensões. De acordo com Ramos et al. (2003), a redução do conteúdo de água, durante o processo de secagem, origina uma redução no tamanho do tecido celular e para Prado et al. (2000), gera a redução da tensão existente no interior das células promovendo, assim, a sua contração volumétrica.

A contração volumétrica pode ser muito intensiva, dependendo do método de secagem aplicado (Krokida e Maroulis, 1997) e das condições de secagem, afetando os parâmetros da transferência de calor e massa e devendo ser considerada no estabelecimento de modelos de secagem (RAMOS et al., 2003).

Khraisheh et al. (2004), observaram que a contração volumétrica dos produtos agrícolas durante a secagem ocorre de maneira heterogênea com relação aos seus eixos principais.

No início da secagem, aparentemente, o produto permanece com a estrutura intacta e mantém sua forma original. Entretanto, com a retirada de água, acontece o seu encolhimento que é acompanhado de deformação das partículas, formação de poros e demais mudanças microestruturais (KOC et al., 2008).

A difusão líquida é o principal mecanismo de transporte de água e ocorre nos sólidos de estrutura fina, nos capilares, nos poros e nos pequenos orifícios ocupados pelo vapor. Todavia, ela não considera a contração volumétrica, o endurecimento da casca e as isotermas de sorção (Barbosa - Cánovas e Veja - Mercado, 2000), o que acarreta em possíveis erros, visto que a deformação dos produtos é observada, principalmente, em produtos com elevado teor de água inicial, como os frutos de café. Além disso, há o fato de que, de modo geral, os grãos e frutos não apresentam uma forma geométrica perfeitamente definida, tornando necessário, para a solução de problemas relacionados à sua geometria, assumir para o produto uma forma conhecida, como esferoide ou elipsoide composto por três dimensões características (Côrrea et al., 2002).

Considerando a importância do estudo teórico do processo de secagem dos produtos agrícolas, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de verificar a influência da contração volumétrica e da forma geométrica na determinação do coeficiente de difusão efetiva durante a secagem de frutos de café.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido no Laboratório de Propriedades Físicas e Avaliação da Qualidade de Produtos Agrícolas no Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem – Centreinar, localizado no Campus da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

Foram utilizados frutos de café, sendo selecionados apenas os de estádio cereja, da variedade Catuaí Amarelo e provenientes de Viçosa-MG. Foram colhidos pelo sistema de derrça no pano, com teor de água inicial médio de 1,25 base seca (b.s.). Para a determinação do teor de água utilizou-se o método padrão de estufa, $105 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, durante 24 h, de acordo com Regras para Análise de Sementes (Brasil, 1992).

A secagem do produto foi realizada em três condições do ar de secagem, $35 \text{ }^\circ\text{C}$ e 32,1%; $45 \text{ }^\circ\text{C}$ e 15,7%; e $55 \text{ }^\circ\text{C}$ e 10,2% de temperatura e umidade relativa, respectivamente. As três condições de temperatura e umidade relativa do ar foram fornecidas por meio de uma unidade condicionadora de atmosfera, de fabricação da empresa Aminco, modelo Aminco-Aire 150/300 CFM. Bandejas removíveis com fundo telado foram colocadas no interior do equipamento para permitir a passagem do ar por meio da amostra, contendo cada uma 50 g de café. A quantidade de produto utilizada promoveu o completo preenchimento da bandeja, formando uma camada delgada de frutos de cerca de 5 cm. O fluxo de ar foi monitorado com o auxílio de um anemômetro de fio quente e mantido constante em torno de $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$. A temperatura e a umidade relativa do ar foram monitoradas por meio de psicrômetro instalado próximo às bandejas, contendo as amostras. As bandejas contendo o produto foram removidas periodicamente da câmara em intervalos variados (mais espaçados no início do processo e com maior periodicidade ao final) e pesadas durante o processo de secagem, até chegarem ao teor médio de 0,13(b.s.). O teor de água de equilíbrio do café para as condições de temperatura e umidade relativa do ar de secagem foi calculado pela equação Henderson-Thompson.

$$U_e^* = \left\{ \frac{\ln(1-\varphi)}{[-a \times (T+b)]} \right\}^{1/c} \quad (1)$$

em que

U_e^* = teor de água de equilíbrio do produto, (b.s.);

φ = umidade relativa, decimal;

T = temperatura do ambiente, $^\circ\text{C}$;

a, b e c = parâmetros que dependem da natureza do produto, para o café em coco: $a = 6,87 \times 10^{-5}$, $b = 46,8549$ e $c = 1,8299$ (Côrrea et al., 2010);

Para a determinação das razões de umidade (RU) do café durante a secagem, nas diferentes condições de ar, a equação 2, foi utilizada:

$$RU = \frac{U_t^* - U_e^*}{U_0^* - U_e^*} \quad (2)$$

em que,

RU = razão de umidade, adimensional;

U_t^* = teor de água do produto para um dado tempo, (b.s.);

U_0^* = teor de água inicial do produto, (b.s.);

Para a comparação do coeficiente de difusão efetiva da secagem dos frutos de café considerando e desprezando a contração volumétrica, utilizou-se a equação para difusão de água (equação 3), que é a segunda lei de Fick.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{ef} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) \quad (3)$$

em que,

- D_{ef} = coeficiente de difusão líquida, ($m^2 s^{-1}$)
 x = distância em relação a um ponto de referência, (m)
 t = tempo, (s);

Segundo Brooker et al. (1992), a solução analítica desta equação para a forma geométrica radial reduz-se a equação 4, na qual faz-se necessário considerar além desta característica, a condição de contorno do teor de água conhecido na superfície do produto e que o coeficiente de difusão efetiva é constante durante o processo de secagem.

$$RU = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left\{ -\frac{n^2 \pi^2}{9} \left[\frac{A}{V} (D_{ef} t)^{1/2} \right]^2 \right\} \quad (4)$$

em que,

- n = número de termos;
 A = área superficial do produto, (m^2);
 V = volume do produto, (m^3);

A solução analítica dessa equação apresenta-se na forma de uma série infinita, podendo o número finito de termos (n) no truncamento determinar a precisão dos resultados. Segundo Afonso Júnior e Corrêa (1999), uma aproximação de oito termos dessa série é adequada para fornecer estimativa satisfatória do coeficiente de difusão efetiva.

Considerando os frutos de café como um esferoide prolato, o volume e a área superficial foram calculados por meio da medição dos três eixos ortogonais (comprimento, largura e espessura, conforme apresentado na Figura 1), ao longo do processo de secagem, com o auxílio de um paquímetro digital e de acordo com as expressões propostas por MOHSENIN (1986):

$$V = \frac{\pi a b c}{6} \quad (5)$$

$$A = \frac{\pi b^2}{2} + \frac{\pi a b}{2e} \times \sin^{-1} e \quad (6)$$

$$e = \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

em que,

- a = maior eixo do produto, (m);
 b = eixo médio do produto, (m);
 c = menor eixo do produto, (m);
 e = excentricidade, adimensional;



Figura 1. Desenho esquemático com corte transversal (a) e longitudinal (b) de um fruto de café considerado como um

esferoide prolato e suas dimensões características.

Se considerarmos os frutos de café como uma esfera, a razão (A/V) reduz-se a equação 8 que representa o raio da esfera equivalente (R), definido como o raio de uma esfera com volume equivalente ao volume daquele produto foi calculado, ao longo do processo de secagem, pela seguinte expressão:

$$R = \left(\frac{abc}{8} \right)^{1/3} \quad (8)$$

Giner e Mascheroni (2002), ao estudarem a cinética de secagem de grãos de trigo, propuseram uma solução analítica simplificada da equação 3, para o cálculo e comparação do coeficiente de difusão efetiva. Segundo os pesquisadores esta a solução analítica da segunda lei de Fick (equação 4), provou ser tão precisas sem perder o significado físico e ser muito mais rápida para sua execução:

$$RU = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{A}{V} \sqrt{D_{ef}t} + 0,331 \left(\frac{A}{V} \right)^2 D_{ef}t \quad (9)$$

Para a estimativa do coeficiente de difusão efetiva foram realizadas análises de regressão não linear, pelo método Gauss-Newton, utilizando-se o programa computacional STATISTICA 7.0®.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 estão apresentados os valores calculados para o coeficiente de difusão efetiva obtido durante a secagem de frutos de café nas diversas condições, considerando a contração volumétrica e desprezando-a, utilizando o raio equivalente (R) e a razão (A/V).

Tabela 1: Coeficiente de difusão efetiva ($m^2 s^{-1}$) obtido durante a secagem de frutos de café nas diversas condições, considerando a contração volumétrica e desprezando-a, utilizando o raio equivalente (R) e a razão (A/V)

Equação	Geometria	Condição do ar de secagem		
		35 °C - 32,1 %	45 °C - 15,7 %	55 °C - 10,2 %
4	A/V constante	$3,152 \times 10^{-11}$	$2,597 \times 10^{-11}$	$6,933 \times 10^{-11}$
4	A/V variável	$3,099 \times 10^{-11}$	$2,528 \times 10^{-11}$	$6,839 \times 10^{-11}$
8	R constante	$2,801 \times 10^{-11}$	$2,286 \times 10^{-11}$	$6,154 \times 10^{-11}$
8	R variável	$2,761 \times 10^{-11}$	$2,241 \times 10^{-11}$	$6,089 \times 10^{-11}$
9	A/V constante	$2,847 \times 10^{-11}$	$2,330 \times 10^{-11}$	$6,548 \times 10^{-11}$
9	A/V variável	$2,791 \times 10^{-11}$	$2,266 \times 10^{-11}$	$6,458 \times 10^{-11}$

Analisando-se os resultados encontrados, pode-se observar que quando a contração volumétrica é considerada (R e A/V variável) os valores do coeficiente de difusão efetiva são ligeiramente menores em comparação aos observados desprezando desse fenômeno (R e A/V constante). Côrrea et al. (2006), ao verificarem a influência da contração volumétrica na determinação do coeficiente de difusão efetiva em grãos de feijão também obtiveram a mesma correspondência. Ramos et al. (2005) também ressaltam que as modificações volumétricas devem ser incluídas nos modelos para uma completa descrição e análise deste processo. Desta forma, os resultados observados no presente trabalho comprovam a importância e a necessidade da introdução desta variável no modelo de difusão líquida para uma estimativa mais precisa do coeficiente de difusão líquida.

Durante a secagem dos frutos de café, o coeficiente de difusão efetiva apresentaram magnitudes entre $2,241 \times 10^{-11}$ a $6,933 \times 10^{-11} m^2 s^{-1}$ para faixa de temperatura de 25 a 55 °C. Estes resultados estão coerentes com os relatados na literatura para secagem de produtos agrícolas que, de acordo com Madamba et al. (1996), apresentam-se na ordem de 10^{-9} a $10^{-11} m^2 s^{-1}$. Observa-se que o coeficiente de difusão apresentou tendência de aumento com o aumento da temperatura. Esse fato é esperado, uma vez que elevando a temperatura a viscosidade da água diminui. Essa propriedade influi diretamente na resistência do fluido ao escoamento, e, portanto, sua diminuição acarreta em maiores facilidades da difusão das moléculas de água nos capilares do produto. Ao comparar os valores calculados do coeficiente de difusão efetiva a partir dos diferentes modelos (raio equivalente, da razão área/volume e da área superficial específica), é possível observar pequenas diferenças. Certamente a utilização da forma geométrica mais próxima possível ao do produto aumentará a precisão dos resultados, como na situação de inclusão da excentricidade, visto que, a simplificação da equação de difusão para o raio equivalente aproxima o volume do produto ao de uma esfera, o que não é real.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos conclui-se que a contração volumétrica e a aplicação da forma geométrica mais próxima possível do formato dos frutos de café influenciam na determinação do coeficiente de difusão, e que estas variações devem ser incluídas nos modelos de cálculo da difusão líquida para melhor a exatidão dos resultados e melhor compreensão da movimentação da água nos produtos agrícolas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C.. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, p. 349-353, 1999.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G.V.; VEJA-MERCADO, H. Deshidratación de alimentos. Ed. Acribia S.A. 2000, 297p.
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, SNDA/DNDV/CLAV. 1982. 365p.
- BROOKER DB, BAKKER-ARKEMA FW & HALL CW. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport, The Avi Publishing Company. 1992. 450p.
- CORRÊA, P. C.; AFONSO JUNIOR, P. C.; QUEIROZ, D. M.; SAMPAIO, C. P.; CARDOSO, J. B..Variação das dimensões características e da forma dos frutos de café durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.3, p.466-470, 2002.
- CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; NOGUEIRA, B. L.. Determinação do coeficiente de difusão líquida dos grãos de feijão. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.8, n.2, p.117-126, 2006 117
- CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; AFONSO JUNIOR, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; VALENTE, D. S. M.. Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of coffee in different processing levels. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 45, p. 2016-2022, 2010.
- GINER, S. A.; MASCHERONI, R. H. Diffusive drying kinetics in wheat, part 2: applying the simplified analytical solution to experimental data. **Biosystems Engineering**, v.81 (1), p. 85-97, 2002.
- Mohsenin, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.
- KHRAISHEH, M. A. M.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. **Food Research International**, v. 34, n. 5, p. 497-503, 2004.
- KOÇ, B.; EREN, I.; ERTEKIN, F. K. Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. **Journal of Food Engineering**, v. 85, n. 3, p. 340-349, 2008.
- KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. **Drying Technology**, v. 15, n. 10, p. 2441-2458, 1997.
- Madamba, P.S.; Driscoll, R.H.; Buckle, K.A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, London, v.29. p.75-97, 1996.
- MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 373-386, 2004
- MOHSEIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. 2. ed. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p
- PRADO, M. E. T.; ALONSO, L. F. T.; PARK, K. J. Shrinkage of dates (Phoenix Dacyilyfera L.) during drying. **Drying Technology**, New York, v. 18, n. 1 e 2, p. 295-310, 2000.
- RAMOS, I. N.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Structural changes during air drying of fruits and vegetables. **Food Science and Technology International**, v. 9, n. 3, p. 201-206, 2003.
- Ramos, I.N.; Brandão, T.R.S.; Silva, C.L.M. Integrated approach on solar drying, pilot convective drying and microstructural changes. **Journal of Food Engineering**, London, v.67, p.195-203, 2005.