

DIFUSIVIDADE EFETIVA DE GRÃOS DE AMENDOIM DURANTE A SECAGEM

WILLIAN D. ARAÚJO¹, ANDRÉ L. D. GONELI², ELTON APARECIDO SIQUEIRA MARTINS³,
CESAR PEDRO HARTMANN FILHO⁴, ALEXANDRE A. GONÇALVES⁵

¹ Eng. Agrônomo, Mestre em Agronomia, UFGD / Dourados-MS, williandiasaraujo@hotmail.com

² Eng. Agrônomo, Prof. Adjunto, UFGD / Dourados-MS, andregoneli@ufgd.edu.br

³ Eng. Agrícola, Mestrando em Engenharia Agrícola, UFGD / Dourados-MS, elton_asm@hotmail.com

⁴ Eng. Agrônomo, Mestrando em Agronomia, UFGD / Dourados-MS, cphartmann21@hotmail.com

⁵ Graduando em Engenharia Agrícola, UFGD / Dourados-MS, alexandre_alves@hotmail.com

Apresentado no
XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2014
27 a 31 de julho de 2014- Campo Grande- MS, Brasil

RESUMO: O objetivo do presente trabalho foi ajustar o modelo da difusão líquida às curvas de secagem de grãos de amendoim e determinar o coeficiente de difusão efetivo para diversas condições controladas de temperatura. Os grãos de amendoim, após a colheita, apresentaram teor de água inicial de 0,59 decimal (b.s.), sendo submetidos à secagem sob condições controladas de temperatura (40, 50, 60 e 70°C), até o teor de água aproximado de 0,04 decimal (b.s.). Utilizou-se o modelo matemático da difusão líquida, com solução analítica para a forma geométrica esférica, com aproximação de oito termos. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem, apresentando valores de 1,1831 a $3,3502 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para a faixa de temperatura do ar estudada. O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura, sendo que sua relação com a temperatura de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão líquida durante a secagem de 31,27 kJ mol⁻¹ para os grãos de amendoim.

PALAVRAS-CHAVE: *Arachis hypogaea* L.; energia de ativação, coeficiente de difusão efetivo

EFFECTIVE DIFFUSIVITY OF PEANUT KERNELS DURING DRYING

ABSTRACT: The objective of the present work was to adjust the liquid diffusion model to peanut kernels drying curves and to determine the effective diffusion coefficient for different controlled temperature conditions. The peanut kernels, after harvest presented an initial moisture content of 0.59 decimal (d.b.), and submitted to drying process under controlled conditions of temperature (40, 50 60 and 70°C), until the approximate moisture content of 0.04 decimal (d.b.). The liquid diffusion mathematical model was used, with analytical solution for spherical geometric shape and eight terms approximation. Based on the obtained results, it can be concluded that the effective diffusion coefficient increases as the drying air temperature increased presenting values from 1.1831 a $3.3502 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ for the temperature range tested. The effective diffusion coefficient increases with temperature elevation, being that its relationship with drying temperature can be described through the Arrhenius equation, which presents an activation energy for the liquid diffusion during drying of 31.27 kJ mol⁻¹ for peanut kernels.

KEYWORDS: *Arachis hypogaea* L.; activation energy; effective diffusion coefficient

INTRODUÇÃO: Assim como muitos produtos agrícolas, os grãos de amendoim são normalmente colhidos com um teor de água inadequado para uma correta e eficiente conservação, com isso, a redução da quantidade de água do material deve ser conduzida com a finalidade de se reduzir a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem no produto durante o armazenamento. Nesse contexto, a secagem é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade e estabilidade após a colheita. Seu principal objetivo é a redução do conteúdo de água até níveis seguros, permitindo longos períodos de armazenamento, sem que ocorram perdas significativas durante o

processo (MARTINAZZO et al., 2010). Diversas teorias e fórmulas empíricas foram desenvolvidas para prever a taxa de secagem (MARTINAZZO et al., 2007). A difusão em produtos agrícolas durante a secagem é um complexo processo que pode envolver diferentes mecanismos, como a difusão molecular, difusão capilar, difusão na superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e difusão térmica (MARTINAZZO et al., 2007). Segundo Brooker et al. (1992), na teoria da difusão líquida a segunda lei de Fick tem sido utilizada para estabelecer a difusão da água em função do gradiente de concentração. O coeficiente de difusão é uma difusividade efetiva que engloba os efeitos de todos os fenômenos, podendo intervir sobre a migração da água, e o seu valor é sempre obtido pelo ajuste das curvas experimentais (MARTINAZZO et al., 2007). Como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem (temperatura, umidade e velocidade do ar), ela não é uma particularidade do material. Sendo assim, o objetivo do presente trabalho foi ajustar o modelo da difusão líquida às curvas de secagem de grãos de amendoim e determinar o coeficiente de difusão efetivo para diversas condições controladas de temperatura.

MATERIAL E MÉTODOS: Os grãos de amendoim foram colhidos manualmente com um teor de água de, aproximadamente 0,59 decimal b.s.. Após a colheita aleatória dos frutos, foi realizada uma seleção, procurando-se retirar todos aqueles que apresentassem defeitos, no intuito de evitar qualquer tipo de influência indesejável que pudesse interferir nos resultados da pesquisa. Posteriormente os frutos foram debulhados manualmente, e uma nova seleção foi realizada, seguindo o mesmo critério de seleção anteriormente aplicado, mas agora selecionando grãos íntegros. A secagem do produto em camada delgada foi realizada para diferentes condições controladas de temperatura (40, 50, 60 e 70°C) e suas correspondentes umidades relativas do ar de secagem de (19, 12, 7 e 6%), respectivamente, em uma estufa com ventilação forçada. Foram colocadas no interior do equipamento, para cada tratamento, duas bandejas metálicas com diâmetro de 30 cm, contendo fundo telado para permitir a passagem do ar através da camada delgada do produto. A temperatura e a umidade relativa do ar foram monitoradas por meio de psicrômetro instalado próximo à estufa, contendo as amostras. Durante o processo de secagem, as bandejas com as amostras foram pesadas periodicamente, sendo utilizada uma balança digital de 0,01 g de resolução. O teor de água entre as leituras foi controlado por meio da diferença de massas (conhecendo-se o teor de água inicial), de forma a não se permitirem diferenças grandes de teor de água entre as leituras. Para fins de modelagem matemática, foi considerada a secagem dos grãos de amendoim até que o produto atingisse o teor de água de 0,04 decimal b.s., aproximadamente, estabelecido como ponto final da secagem.

O coeficiente de difusão efetivo para as condições de secagem utilizadas neste trabalho foi calculado ajustando-se o modelo baseado na teoria da difusão líquida aos dados observados. A equação utilizada é a solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando a forma geométrica do produto como esférica, desconsiderando a contração volumétrica dos grãos e considerando a condição de contorno de teor de água conhecida na superfície do grão (BROOKER et al., 1992). Assim, o coeficiente de difusão efetivo, assumindo-se a forma geométrica do amendoim como esférica e raio equivalente de 6,14 mm, foi obtido por regressão não linear, com aproximação de oito termos, utilizando o software Statística 7.0[®], utilizando-se a equação 1:

$$RU = \frac{U^* - U_e^*}{U_i^* - U_e^*} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n_t=1}^{\infty} \frac{1}{n_t^2} \exp \left[-\frac{n_t^2 \cdot \pi^2 \cdot D_i \cdot \theta}{9} \cdot \left(\frac{3}{R_e} \right)^2 \right] \quad (1)$$

em que,

D_i - coeficiente de difusão de líquido, $m^2 s^{-1}$; R_e - distância radial até a superfície, m; e n_t - número de termos.

Para avaliar a influência da temperatura no coeficiente de difusão efetivo, foi utilizada a equação de Arrhenius, descrita da seguinte forma:

$$D_i = D_o \exp \left(-\frac{E_a}{R T_a} \right) \quad (2)$$

em que,

D_0 - fator pré-exponencial; R - constante universal dos gases, $8,314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$;
 E_a - energia de ativação, kJ mol^{-1} ; e T_a - temperatura absoluta, K.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Na Tabela 1, são apresentados os valores médios do coeficiente de difusão efetivo obtidos durante a secagem dos grãos de amendoim para diferentes condições de temperatura do ar.

TABELA 1. Coeficientes de difusão efetivo ajustados às diferentes temperaturas de secagem em camada fina dos grãos de amendoim.

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	$D \times 10^{-10} \text{ (m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$
40	1,1831
50	1,6988
60	2,4724
70	3,3502

Observando a Tabela 1, podemos observar que os valores do coeficiente de difusão efetivo aumentaram com o aumento da temperatura do ar de secagem. Quando há um aumento da temperatura, a viscosidade da água diminui e, sendo a viscosidade uma medida da resistência do fluido ao escoamento, variações dessa propriedade implicam em alterações na difusão da água nos capilares do grão de amendoim de modo a favorecer a movimentação do fluido no produto. Com a elevação da temperatura, aumenta-se o nível de vibração das moléculas de água, o que também contribui para uma difusão mais rápida (GONELI et al., 2007). Normalmente o coeficiente de difusão efetivo é utilizado, devido à complexidade, além de limitadas informações a respeito do movimento da água no interior dos alimentos durante a secagem. A variação entre os valores do coeficiente de difusão ficaram entre $1,1831$ a $3,3502 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente, para a faixa de temperatura de 40 a 70°C , utilizando o raio equivalente inicial dos grãos. Os valores do coeficiente de difusão calculados para os grãos de amendoim 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 $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. A dependência do coeficiente de difusão efetivo com relação à temperatura do ar de secagem tem sido satisfatoriamente descrita pela equação de Arrhenius (CORRÊA et al., 2007; GONELI et al., 2007; KASHANINEJAD et al., 2007). A Figura 1 mostra os valores de $\ln(D)$ em função do inverso da temperatura absoluta ($1/\text{K}^{-1}$) obtidos para os grãos de amendoim.

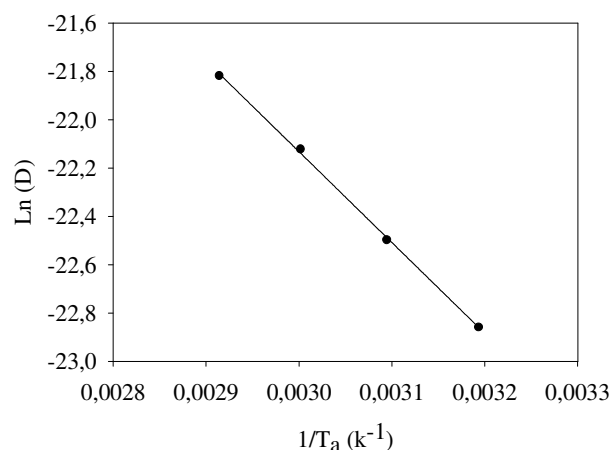


FIGURA 1. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo, em função da temperatura do ar, durante a secagem dos grãos de amendoim.

A inclinação da curva da representação de Arrhenius fornece a relação E_a/R , enquanto a sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de D_0 . A Equação (3) apresenta os coeficientes da equação de

Arrhenius ajustada para o coeficiente de difusão efetivo dos grãos de amendoim calculados de acordo com a Equação 2.

$$D_i = 1,9416 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{31.266,7998}{R T_a}\right) \quad (3)$$

A energia de ativação para o fenômeno de secagem do amendoim foi de 31,27 kJ mol⁻¹ na faixa de temperatura entre 40 e 70 °C. A energia de ativação é definida, como a facilidade com que as moléculas de água superam a barreira de energia durante a migração no interior do produto (CORRÊA et al., 2007). Nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade de água no produto. Segundo Zogzas et al. (1996), a energia de ativação para produtos agrícolas varia entre 12,7 a 110 kJ mol⁻¹, estando a energia de ativação encontrada no presente trabalho dentro da faixa destes valores propostos pelo mesmo autores.

CONCLUSÕES: O coeficiente de difusão efetivo aumenta gradativamente sua magnitude com a elevação da temperatura do ar de secagem. A relação do coeficiente de difusão efetivo com a temperatura do ar de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão durante a secagem dos grãos de amendoim de 33,96 kJ mol⁻¹.

AGRADECIMENTOS: A Capes e à Fundect, pelo apoio financeiro à pesquisa.

REFERÊNCIAS

BROOKER, D. B.; BAKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oil seeds**. New York: AVI Book Publisher, 1992. 450p.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, v.27, p.501-507, 2007.

GONELI, A. L. D.; CORREA, P. C.; RESENDE, O.; REIS NETO, S. A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.27, p.135-140, 2007.

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.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Enthalpy– entropy compensation models for sorption and browning of garlic. **Journal of Food Engineering**, v.28, p.109–119, 1996.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, p.301-306, 2007.

MARTINAZZO, A. P.; MELO, E. C.; CORRÊA, P. C.; SANTOS R. H. S. Modelagem matemática e parâmetros qualitativos da secagem de folhas de capim limão *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf. **Rev. Bras. Pl. Med.**, Botucatu, v.12, n.4, p.488-498, 2010.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, New York, v.14, n.10, p.2225-53, 1996.