

DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE CINCO VARIEDADES DE CAFÉ CEREJA DESCASCADO¹

BORÉM, F.M.²; RIBEIRO, R.C.M.S.³; CORRÊA, P.C.⁴; RIBEIRO, D.M.⁵ e RESENDE, O.⁵

¹ Extraído da Tese de Mestrado apresentada pelo segundo autor à Universidade Federal de Lavras, UFLA; ² Professor Adjunto, Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras – UFLA, Caixa Postal 37, Lavras, MG, CEP 37.200-000; ³ Eng. Eletricista, M.S. em Ciência dos Alimentos – UFLA, MG, Caixa Postal 232, Lavras, MG, CEP 37.200-000; ⁴ Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, UFV, MG, CEP 36571-000; ⁵ Eng. Agrícola, mestrando do Departamento de Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Lavras, UFLA, MG, CEP 37.200-000.

RESUMO: O presente trabalho teve como objetivo determinar experimentalmente os valores da difusividade térmica, bem como ajustar equações matemáticas, para relacionar essa propriedade com o teor de água de cinco variedades de café em pergaminho. Foram estudadas as variedades Catuaí, Catucaí vermelho, Catucaí amarelo, Acaia e Rubi. A difusividade térmica foi determinada pelo método indireto, utilizando os valores obtidos para massa específica aparente, calor específico e condutividade térmica. Os valores observados foram submetidos à análise de regressão, os quais ajustaram-se melhor a uma equação polinomial do segundo grau. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que a difusividade térmica diminuiu com o aumento do teor de água para todas as variedades estudadas. Não foi possível ajustar um modelo matemático único para as cinco variedades estudadas, indicando haver efeito da interação teor de água e variedade.

Palavras-chave: café descascado, difusividade térmica, teor de água, variedade.

PULPED CHERRY THERMAL DIFFUSIVITY OF FIVE COFFEE VARIETIES

ABSTRACT: This work had as its aim to determine the thermal diffusivity and adjust a model for correlation this thermal property with moisture content for five different varieties of coffees in parchment. The measured were made for the following varieties: Catuaí, Catucaí vermelho, Catucaí amarelo, Acaia and Rubi. The thermal diffusivity was determined by the indirect method, using the values obtained for the specific mass, specific heat and thermal conductivity. The observed values of this property were submitted to a regression analysis, which were better adjusted by a second-degree polynomial equation. It was concluded that the thermal diffusivity decrease with the moisture. It was not possible to adjust a single mathematical model for the five varieties studied, which points out an interaction effect of the moisture content and the varieties.

Key words: Peeled Coffee, thermal diffusivity, moisture content, variety.

INTRODUÇÃO

A difusividade térmica é uma propriedade importante para a simulação de processos térmicos nos quais a transferência de calor ocorre em estado não-estacionário. Essa propriedade é requerida para prever relações tempo - temperatura que podem causar mudanças de nutrientes e texturas.

Segundo Incropera e Dewitt (1992), a difusividade térmica se relaciona à capacidade do material de conduzir e acumular energia térmica, ou seja, valores mais elevados do coeficiente de difusividade indicam maior velocidade de resposta, em busca do novo estado de equilíbrio, às variações do ambiente térmico. Devido à heterogeneidade dos materiais agrícolas, vários são os fatores a influenciar a quantidade de calor que atravessa uma massa granular, podendo os valores da difusividade térmica variar entre amostras, devido, principalmente, à sua composição, densidade, difusividade térmica e teor de água.

Segundo Mohsenin (1975), a difusividade térmica pode ser considerada como a taxa com que o calor é difundido para fora do material. Em termos físicos, a difusividade térmica dá uma medida de como a temperatura pode variar quando um material é aquecido ou resfriado. Assim, essa propriedade é importante quando se considera transferência de calor em regime transiente. Essa propriedade pode ser determinada indiretamente utilizando a relação entre condutividade térmica, calor específico e densidade, por meio da equação 1.

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p} \quad \text{Equação (1)}$$

em que:

α : difusividade térmica ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$);

K : condutividade térmica ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);

C_p : calor específico a pressão constante ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);

ρ : massa específica (kg).

Segundo Pabis et al. (1998), a condução de calor transitória ou de estado não constante ocorre comumente durante o aquecimento ou resfriamento de produtos agrícolas. A taxa na qual o calor é difundido para fora ou para dentro da camada porosa de material agrícola depende da difusividade térmica

do material. A partir da equação 1, pode ser concluído que uma relação linear entre a difusividade térmica e o teor de água de um sólido não deve ser esperada. Isso também foi confirmado por Kazarian e Hall (1965), e podemos também concluir que a amplitude da difusividade térmica influencia a cinética de secagem. Usualmente, a difusividade térmica é calculada usando os valores experimentalmente medidos de condutividade térmica, calor específico e massa específica do grão, o que é conhecido como método indireto. Este método pode levar a resultados aproximados com um erro relativo que é difícil de estimar com relação ao valor verdadeiro real, que pode somente ser determinado com base em mensurações diretas.

Em termos físicos, a difusividade térmica dá uma medida de como a temperatura pode variar quando um material é aquecido ou resfriado. A metodologia proposta por Dickerson (1965) tem sido a mais usada nas determinações experimentais. A teoria deste método está baseada em uma condição de transferência de calor em regime transiente, para o qual as temperaturas da amostra variam linearmente com o tempo, minimizando, assim, a dificuldade de satisfazer condições de contorno. Simultaneamente, a diferença de temperatura que indica a difusividade térmica não varia com o tempo, facilitando a análise e interpretação dos dados; o método produz dados aplicáveis ao intervalo de temperatura através do qual o fluido é aquecido ou resfriado e permite o cálculo da difusividade térmica a partir de um único experimento.

Rossi e Roa (1980) verificaram, na determinação da difusividade térmica dos frutos de café de variedade desconhecida, com teores de água de 13,4 e 44,5% (b.u.), que a difusividade térmica diminui com o aumento do teor de água do produto, independentemente da forma de preparo, e obtiveram, respectivamente, os valores de $1,004 \times 10^{-7}$ e $1,107 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Afonso Júnior e Corrêa (2000), estudando a massa de grão de café, preparado por via seca e úmida, observaram que os valores da difusividade térmica, para o café descascado, variaram de $1,357 \times 10^{-7}$ a $1,699 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, para teores de água variando de 0,111 a 0,597 (b.s.). Para o café em coco, a difusividade térmica variou de $1,0694 \times 10^{-7}$ a $1,5441 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, para teores de água variando de 0,111 a 0,678 (b.s.), enquanto para o café despulpado a difusividade térmica teve uma variação de $1,344 \times 10^{-7}$ a $2,078 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, para teores de água variando de 0,111 a 0,621 (b.s.). Os autores relatam, também, que não há diferenças acentuadas no comportamento das formas analisadas de preparo do café descascado contendo ou não a parte da mucilagem, o que pouco interfere nas propriedades termofísicas do produto.

Almeida (1979) constatou que a difusividade térmica de amêndoas de cacau, com 11 níveis de umidade, é função quadrática, tanto com o teor de água como com a massa específica aparente. Além

disso, é determinada indiretamente, usando os valores experimentais da condutividade térmica, do calor específico e da massa específica, como descrito pela equação 1.

Wratten et al. (1969) concluíram que a difusividade térmica do grão de arroz de comprimento médio decresce com o aumento do teor de água, variado linearmente. Esse resultado para o arroz está em contraste com os de Kazarian e Hall (1965), que obtiveram comportamento quadrático para a difusividade térmica do trigo e milho.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido na Universidade Federal de Lavras e no Laboratório de Propriedades Físicas e Avaliação de Qualidade de Produtos Agrícolas do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), situado no campus da Universidade Federal de Viçosa – MG. Foi avaliada a difusividade térmica de cinco variedades de café cereja descascado (*Coffea arabica L.*) (Acaiaí, Rubi, Catuaí, Catucaí Amarelo e Catucaí Vermelho), com umidade média de 55% b.u, os quais foram colhidos manualmente sobre pano no setor de cafeicultura da Universidade Federal de Lavras - UFLA. Após a colheita, o café, de cada uma das variedades, foi lavado e separado em café bóia, verde e cereja. A porção formada pelo café cereja foi descascada em um descascador mecânico, acondicionada em seguida em sacos de polietileno trançado e colocada em terreiro de cimento para remoção do excesso de água. Amostras de cada variedade foram retiradas para determinação do teor de água. Para evitar possíveis alterações no café em função do seu alto teor de água, todo o material foi mantido em câmara fria a 5°C.

Para obter-se os demais níveis de umidade, cerca de 5 kg de café úmido, de cada uma das variedades, foram colocados em estufa com ventilação forçada, com temperatura constante de 60°C. O peso final, correspondente a cada nível de umidade desejado, foi calculado a partir das equações 2 e 3:

$$P_Q = \left\{ \left(\frac{U_i - U_f}{100 - U_f} \right) \right\} \times 100$$

$$P_f = P_i - (P_i \times P_Q)$$

Equação (2)

em que

Pf : peso final (kg);

Pi : peso inicial (kg);

PQ : porcentagem de quebra (%);

Ui : umidade inicial (% b.u.);

Uf : umidade final (% b.u.).

Após a secagem foram obtidos os seguintes níveis de umidade (% b.u.):

Catuaí: 9,05; 12,87; 14,24; 17,60; 26,22; 28,40; 34,66; 43,19; 47,90.

Catuaí Vermelho: 10,16; 12,96; 13,62; 20,71; 27,18; 29,65; 33,37; 41,18; 45,27.

Catuaí Amarelo: 10,10; 11,39; 13,53; 19,50; 25,29; 29,46; 34,26; 44,14; 47,98.

Acaí: 9,60; 11,87; 13,63; 17,88; 24,55; 27,87; 35,91; 40,78; 47,66.

Rubi: 9,69; 11,08; 12,43; 22,75; 27,55; 29,16; 37,15; 42,90; 48,73.

O teor de água foi determinado usando-se o método-padrão de estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$, durante 24 horas (Brasil, 1992).

A difusividade térmica foi determinada indiretamente (equação 1), usando os valores experimentais encontrados para massa específica aparente, calor específico e condutividade térmica.

Os dados foram submetidos a análises estatísticas quantitativas, determinando-se as equações de regressão a 95% de confiabilidade, com base nos coeficientes de determinação R^2 apresentados, objetivando determinar a natureza e o comportamento da curva de resposta destas em função dos tratamentos propostos. As análises de regressão foram precedidas de uma análise de variância, a fim de comprovar estatisticamente se os dados apresentavam diferença significativa entre os tratamentos. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC), em três repetições, com um fator variante (teor de água) nos nove níveis de umidade.

O modelo de regressão foi apresentado por:

$$Y_{ij} = a + bx_j + cx_j^2 + d_{ij}$$

sendo para cada $i = 1, 2, 3, 4$ e 5 .

em que

a, b, e c : coeficientes de regressão;

d_{ij} : efeito do desvio de regressão;

x_j : i-ésimo teor de água;

Y_{ij} : média do j-ésimo teor de água.

Todas as análises foram feitas utilizando o programa SISVAR 4.0, segundo Ferreira (2000).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da análise de variância do efeito das variedades e do teor de água sobre a difusividade térmica. Observou-se que a interação variedade vs. teor de água afetou significativamente, em nível de 5% de probabilidade ($P < 0,05$), os valores da difusividade térmica do café cereja descascado, não sendo possível ajustar uma única equação para explicar as variações constatadas. Buscou-se, então, ajustar equações separadamente para cada uma das variedades estudadas.

Os valores calculados para a difusividade térmica a partir dos dados observados, bem como os valores estimados pelas equações ajustadas, são apresentados na Figura 1. Observa-se que a difusividade térmica reduziu com o aumento do teor de água e a equação quadrática foi a que melhor se ajustou aos dados calculados.

Os valores da difusividade térmica variaram entre $3,0 \times 10^{-7}$ e $1,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, para todas as variedades de café cereja descascado, nos teores de água entre 10 e 50% (b.u.). Relações quadráticas foram descritas por Afonso Júnior e Corrêa (2000) e Rossi e Roa (1980), relatando valores para a difusividade térmica de café na mesma ordem de grandeza que os encontrados neste trabalho. Chandrasekar e Viswanathan (1999) relatam valores de até $2,36 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para a difusividade térmica de frutos de café com 9,9% (b.u.) de teor de água.

Segundo Pabis et al. (1998), considerando que a difusividade térmica é função da condutividade térmica, do calor específico e da massa específica aparente, pode-se concluir que não se espera uma relação linear entre a difusividade térmica e o teor de água de um corpo sólido.

Equações descritas por diversos autores para estimar a difusividade térmica consideram também a temperatura e a massa específica, além do teor de água do produto (Pabis et al. 1998). Observa-se que, exceto para a cultivar Acaíá, os coeficientes ajustados das equações para a difusividade térmica foram os menores obtidos entre as propriedades estudadas. Sugere-se que, em estudos subsequentes, variáveis como a temperatura e massa específica sejam incluídas nos modelos propostos.

Tabela 1 - Resumo da análise de variância da difusividade térmica para cinco variedades de café cereja descascado e nove teores de água

Fonte de Variação	GL	Difusividade térmica
Variedade	4	0,006039*
Teor de água	8	0,038262*
Variedade x Teor de água	32	0,0007289*
Resíduo	90	0,000170
CV (%)		7,47
Média geral		0,1744506

* Significativo a 5% de probabilidade.

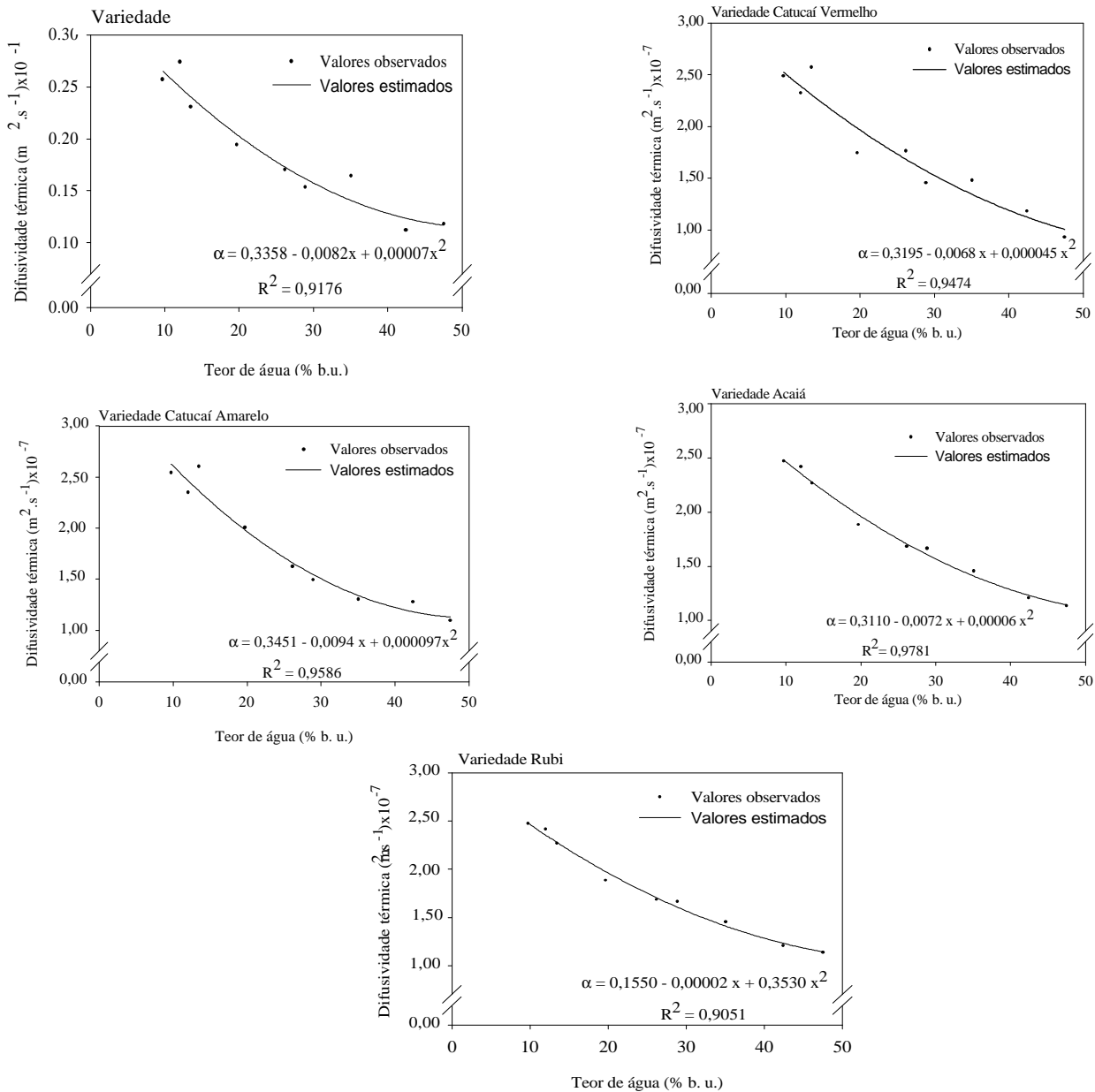


Figura 1 - Gráfico da difusividade térmica das variedades Catucaí, Catucaí Vermelho, Catucaí Amarelo, Acaiaí, Rubi, em função do teor de água

CONCLUSÃO

Considerando a análise dos resultados obtidos e as condições experimentais deste trabalho, pode-se concluir que:

- Não foi possível ajustar uma única equação para todas as variedades estudadas em função do teor de água.
- A equação polinomial de 2º grau foi a que melhor se ajustou aos dados observados para todas as variedades analisadas.
- A difusividade térmica diminuiu com o aumento do teor de água para todas as variedades estudadas.
- Os valores da difusividade térmica variaram entre $3,0 \times 10^{-7}$ e $1,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para todas as variedades de café cereja descascado nos teores de água entre 10 e 50% (b.u.).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C. Propriedades térmicas dos grãos de café. SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1.,2000, Poços de Caldas, MG. **Resumos expandidos...** Brasília; Embrapa Café e MINASPLAN 2000. v.2, p. 1142-1146.
- ALMEIDA, B.V. **Determinação das propriedades físicas de amêndoas de cacau.** Viçosa: UFV, 1979. 70p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Agrícola).
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma agrária, **Regras para análise de sementes (RAS)**, Brasília, 1992. 365p.
- CHANDRASEKAR, V.; VISWANATHAN, R. Physical and thermal properties of coffee. **Jornal Agricultural Engineering**, India, New Delhi, n73, p.227-234, feb. 1999.
- DICKERSON, JR, R.W. An Apparatus for the Measurement of Thermal Diffusivity of Foods, **Food technology**, Chicago, v.19, p.880-886, may 1965.
- FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA UFSCar, 45, 2000, São Carlos. **Anais...**, São Carlos: UFSCar, 2000, p.255-258.
- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 1992. 380p.
- MOHSENIN, N.N. **Thermal properties of foods and agricultural materials.** (Part I: Basic concepts and specific heat). Department of Agricultural Engineering. The Pennsylvania State University, 1975. 160 p.

PABIS, S.; JAYAS, D.S.; CENKOWSKI, Grain drying: theory and practice. New York: Jhon Wiley & Sons; Inc. 1998. 303p.

ROSSI, S.J.; ROA, O. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural.** São Paulo: Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1980. 295p.

WRATTEN, F.T.; POOLE, W.D.; CHESNESS, J.L.; BAL, S.; RAMARAO, V. Physical and thermal properties of rough rice. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v.12 n.6, p. 801-803, 1969.