

Bento Vilar de Almeida
 José Borges Pinheiro Filho
 Tetuo Hara
 Maria Fortes**

RESUMO

O trabalho teve, por objetivos, determinar a difusividade térmica aparente de amêndoas de cacau, e ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais em função do teor de umidade e de massa específica aparente.

A difusividade térmica foi determinada utilizando-se os dados experimentais de condutividade térmica aparente, calor específico a pressão constante e massa específica aparente, obtidos com amêndoas de cacau em fase final de fermentação, cedidas pela Estação Experimental Filogônio Peixoto, da CEPLAC, Linhares - ES.

Os testes foram conduzidos no interior de uma câmara climática, com temperatura de 18°C e umidade relativa de 40%, usando-se amêndoas, com teor de umidade de 0,8%; 2,8%; 7,6%; 14,7%; 20,8%; 23,0; 25,0; 34,4%; 43,3%; 74,3% e 205,4% (b.s.).

Os resultados obtidos permitem concluir que a difusividade térmica aparente de amêndoas de cacau é função quadrática, tanto com teor de umidade, quanto com a massa específica aparente, com mínimo em 48% de umidade (b.s.).

SUMMARY

The present work had a twicfold objective: a) to determine the apparent thermal diffusivity of cocoa beans and b) to adjust mathematical models to experimental data in function of the moisture content and the bulk density of cocoa beans.

The thermal diffusivity was determined by using experimental data of apparent thermal conductivity, specific heat at constant pressure and bulk density. All the information was obtained on cocoa beans in their final stage of fermentation given by the "Filogônio Peixoto" Experimental Station, CEPLAC, Linhares - ES.

The test were conducted in an environmental controlled chamber at temperature of 18°C and relative humidity of 40%. The cocoa beans had initially moisture contents of 0,8; 2,8, 7,6; 14,7; 20,8; 23,0; 25,0; 34,4; 43,3; 74,3 and 105,4% (d.b.)

It was observed that the apparent thermal diffusivity of the cocoa beans is a quadratic function of the moisture content and bulk density.

INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades térmicas de produtos agrícolas é essencial para pesquisadores e projetistas, no campo da Tecnologia e da Engenharia

- (*) Parte da Tese apresentada pelo primeiro autor à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Engenharia Agrícola para obtenção do Grau de "Magister Scientiae."
- (**) Respectivamente Prof. Colaborador, nível III, UFPb, Prof. Adjunto, Prof. Titular e Professor Adjunto, UFV.

ria de Alimentos para vários fins, podendo-se enumerar taxas de secagem ou distribuição de temperatura no interior de alimentos de composição e geometria variadas, quando submetidos a diferentes condições de secagem e resfriamento, e dispositivos de desidratação e esterilização. A aplicação de tais propriedades, no entanto, apresenta inúmeras restrições, pois variam segundo condições ambientais, variedade e tipo de grãos, localização e fertilidade de solos, práticas agrícolas empregadas e período de armazenamento.

Em face da crescente demanda de alimentos e das condições favoráveis do mercado internacional, a secagem artificial de produtos agrícolas, vem se tornando um dos objetivos primordiais da política agrícola brasileira. Embora o Brasil seja um dos principais produtores e exportadores mundiais de cacau - segundo dados publicados pela FAO (1977) e pela ONU (1977) - a secagem artificial desse produto constitui, ainda, um setor de experimentação, em fase de desenvolvimento. Além de não constarem da literatura relatos definitivos sobre as condições limites de secagem, os poucos trabalhos divulgados são, ainda, contraditórios. Segundo MARAVALHAS (1976) estudos sobre as propriedades físicas das amêndoas de cacau, antes e depois da fermentação, nunca foram executados. O presente estudo teve por objetivos: a) determinar a difusividade térmica aparente de cacau em amêndoas para diversos teores de umidade, à temperatura ambiente de 18°C; b) ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais em função do teor de umidade e da massa específica aparente.

REVISÃO DE LITERATURA

KAZARIAN e HALL (1965)* estudaram a difusividade térmica de milho e de trigo, pelo método transitório, usando uma caixa metálica retangular cheia de grãos. Observaram que os resultados obtidos por este processo são ligeiramente inferiores aos que calcularam, usando os valores de condutividade térmica, calor específico e massa específica aparente. NIX et alii (1967) usaram o método transitório para estudar a difusividade térmica de materiais amorfos, utilizando uma fonte linear de calor. Afirmaram que a técnica, além de possibilitar a obtenção de medidas rápidas e precisas das propriedades térmicas dos materiais, conduz à determinação direta da difusividade térmica, independente do calor específico e da massa específica.

WRATTEN et alii (1969) estudaram a difusividade térmica aparente de grãos de arroz no intervalo de umidade de 12% a 20% b.u., utilizando dados experimentais de condutividade térmica, massa específica aparente e calor específico. Obtiveram uma relação linear entre a difusividade térmica e o teor de umidade.

QUADRO 1 - Difusividade Térmica de Produtos Vegetais e Animais (m²/s)

PRODUTO	Faixa de Teor de Umidade	Faixa de Temperatura	Valor ou Expressão	Referência
Abóbora	733 - 1567	25	$1,47 \times 10^{-7}$ - $1,63 \times 10^{-7}$	9
Alfafa	88,6 - 141	20 - 80	$2,84 \times 10^{-4}$ - $4,14 \times 10^{-4}$	4
Alfafa	890	29,4 - 46,1	$6,01 \times 10^{-7}$ - $2,1 \times 10^{-8}$	8
Amendoim moído	8	7,2 - 37,8	$2,05 \times 10^{-7}$ - $1,579 \times 10^{-9T}$	10
Arroz	13,7 - 25	-	$1,35 \times 10^{-7}$ - $2,49 \times 10^{-7U}$	12
Batata	-	24,4	$1,632 \times 10^{-7}$ - $2,905 \times 10^{-9D*}$	6
Batata branca	456	25	$1,65 \times 10^{-7}$ - $1,84 \times 10^{-7}$	9

(*) Os resultados apresentados pela literatura são encontrados no Quadro 1

*D = Período de Armazenagem (horas)

PRODUTO	Faixa de Teor de Umidade	Faixa de Temperatura	Valor ou Expressão	Referência
Batata doce sólida	-	Ambiente	1,290 x 10 ⁻⁷	1
Carne de galinha	-	76,7	1,51 x 10 ⁻⁷	3
Colza granular	1 - 25	- 26	1,035 x 10 ⁻⁷ - 9,78 x 10 ⁻⁸	7
Colza granular	1 - 25	19	9,96 x 10 ⁻⁸ - 9,60 x 10 ⁻⁸	7
Milho	1 - 43	20,8 - 52,6	1,02 x 10 ⁻⁷ - 9,2 x 10 ⁻⁸	5
Purê de batata	-	Ambiente	1,388 x 10 ⁻⁷	1
Salada de batata	-	1,7 - 71,1	1,46 x 10 ⁻⁷	2
Soja	8,7 - 67	20 - 50	4,5 x 10 ⁻⁸	11
Trigo	1 - 43	21 - 44,1	9,0 x 10 ⁻⁸ - 8,0 x 10 ⁻⁸	5

A difusividade térmica de amendoim em casca, amêndoas e casca de amendoim moídas, foi determinada por SUTTER *et alii* (1975), pelo método transitório, independentemente do calor específico e da massa específica. Para amostras condicionadas às temperaturas de 4°C, 10°C, 16°C e 21°C, os resultados indicam que a difusividade térmica decresce, linearmente, com o aumento de temperatura e apresentam menor valor para amendoim em casca e maior para amêndoas moídas. WATTS e BILANSKI (1973) realizaram estudos para determinação direta da difusividade térmica de grãos de soja, pelo método transitório. Determinaram a difusividade térmica de 90 grãos individuais, com o teor de umidade variando de 8% a 40%, b.u. Observaram que os resultados são, praticamente, independentes do teor de umidade e da temperatura. MOYSEY *et alii* (1977) usaram o método transitório para determinar a difusividade térmica de grãos de colza. O teor de umidade das amostras variou de 1% a 20%, b.u., e a temperatura de -26°C a 19°C. Os resultados obtidos são ligeiramente inferiores à difusividade térmica de milho e de trigo, e de crescem com o aumento do teor de umidade a uma temperatura fixa.

MATERIAL E MÉTODOS

No presente estudo foram utilizadas amêndoas de cacau em fase final de fermentação, procedentes da Estação Experimental "Filogônio Peixoto", da CEPLAC, Linhares - ES.

A difusividade térmica foi determinada utilizando-se os valores experimentais de condutividade térmica aparente, calor específico a pressão constante e massa específica aparente. Os testes foram realizados no interior de uma câmara climática, à temperatura ambiente de 18°C e umidade relativa de 40%. Usaram-se amêndoas com teor de umidade de 0,8%; 2,8%; 7,6%; 20,8%; 23,0%; 25,0%; 34,4%; 43,3%; 74,3 e 105,4% (b.s.); estes teores de umidade foram obtidos por remoção de umidade do material em estufa ventilada, a 105°C ± 1°C a partir da umidade inicial (105,4%, b.s.). Após resfriamento em dessecadores, as amostras de cada nível de umidade foram acondicionadas em sacos plásticos dentro da câmara climática, durante 24 horas, a fim de entrar em equilíbrio térmico com o ambiente para as posteriores determinações.

Os teores de umidade das amostras - média dos teores de umidade antes e depois de cada teste - foram determinados com amostras em torno de 25g, pelo processo da estufa a 105°C ± 1°C durante 72 horas, com 4 repetições.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores obtidos para a difusividade térmica aparente da massa granu

lar de cacau, são mostrados no Quadro 2. Observa-se que a difusividade térmica decresce com o aumento do teor de umidade, até o ponto correspondente a 43% (b. s.); a partir deste ponto, a difusividade térmica cresce com o teor de umidade.

QUADRO 2 - Difusividade Térmica Aparente das Amêndoas de Cacau*

Teor de Umidade (% b.s.)	α ($10^{-8} \frac{m^2}{s}$)	s ($10^{-9} \frac{m^2}{s}$)	CV (%)	S_N ($10^{-9} \frac{m^2}{s}$)	Limites de Confiança para a Média ($10^{-8} m^2/s$)	
					Li	Ls
0,8	11,3	7,0	6,2	2,1	10,8	11,8
2,8	10,2	8,8	8,6	2,6	9,6	10,8
7,6	9,35	4,6	4,9	1,3	9,06	9,64
14,7	9,01	7,3	8,1	2,1	8,54	9,48
20,8	8,53	4,6	5,4	1,5	8,19	8,87
23,0	8,31	5,1	6,1	1,5	7,97	8,65
25,0	8,16	5,1	6,3	1,6	7,80	8,52
34,4	7,87	4,4	5,7	1,4	7,55	8,19
43,3	7,093	5,0	7,0	1,6	6,731	7,455
74,3	7,746	5,2	6,7	1,6	7,38	8,11
105,4	8,859	3,2	3,6	1,0	8,633	9,085

* α = Média, com 10 repetições; s = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação; S_N = Desvio padrão da média; Li e Ls = Respectivamente limites inferior e superior do intervalo de confiança;
b.s. = Base seca.

A relação entre a difusividade térmica e o teor de umidade foi determinada por análise de regressão. A equação ajustada foi:

$$\alpha = 1,112 \times 10^{-7} - 2,216 \times 10^{-7}U + 3,41 \times 10^{-7}U^2 \quad (1)$$

$$R^2 = 0,94$$

$$s = 3,1 \times 10^{-9}$$

onde:

α = Difusividade térmica aparente (m^2/s)

R^2 = Coeficiente de determinação (adimensional)

U = Teor de umidade (decimal, b.u.)

s = Desvio padrão da regressão (m^2/s)

A equação 1 tem ponto de mínimo em 32,5% de umidade (b.u.); os parâmetros são significativos ao nível de 1% de probabilidade. KAZARIAN e HALL (1965) obtiveram relações semelhantes para milho e trigo. Todavia, WRATTEN et alii (no ano de 1969) obtiveram relações lineares para arroz.

A relação entre a difusividade térmica e o teor de umidade é mostrada na Figura 1.

A expressão que relaciona a difusividade térmica aparente das amêndoas de cacau com sua massa específica aparente, é, também, uma função quadrática, com ponto de mínimo em 48,8% de umidade (b.s.), idêntico ao da equação 1. A equação ajustada foi:

$$\alpha = 8,531 \times 10^{-7} - 3,208 \times 10^{-9}\rho + 3,3 \times 10^{-12}\rho^2 \quad (2)$$

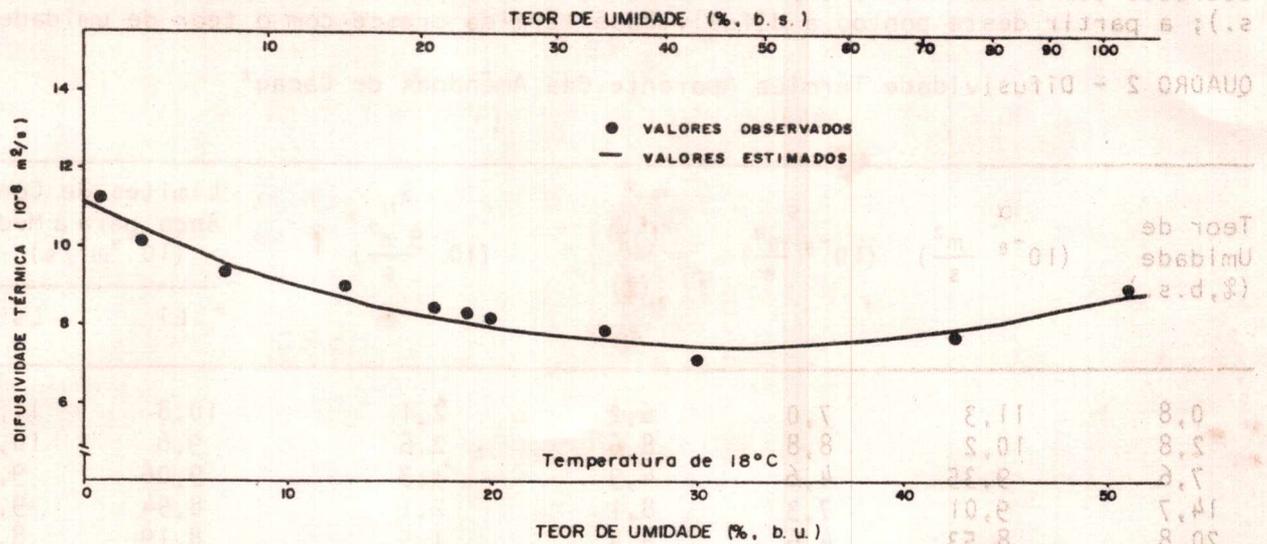


FIGURA 1 - Variação da difusividade térmica aparente das amêndoas de cacau, com o teor de umidade.

$$R^2 = 0,88$$

$$s = 6 \times 10^{-9}$$

onde:

α = Difusividade térmica aparente (m²/s)

R^2 = Coeficiente de determinação (adimensional)

s = Desvio padrão da regressão (m²/s)

ρ = Massa específica aparente (kg/m³)

Os parâmetros da equação 2 são significativos ao nível de 1% de probabilidade.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a difusividade térmica aparente de amêndoas de cacau é função quadrática, tanto com o teor de umidade, quanto com a massa específica aparente, com mínimo em 48% de umidade (b.s.)

LISTA DE SÍMBOLOS

b.s. = Base seca

b.u. = Base úmida

R^2 = Coeficiente de determinação (adimensional)

T = Temperatura (°C)

U = Teor de umidade (decimal, b.u.)

α = Difusividade térmica aparente ($\frac{m^2}{s}$)

ρ = Massa específica aparente ($\frac{kg}{m^3}$)

LITERATURA CITADA

- CRUMPTON, W.R. & THREADGILL, E.D. Thermal diffusivity of sweet potatoes. *Transactions of the ASAE*, 20(3): 589-592. 1977.
- DICKERSON, Jr. R.W. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. *Food Technology*, 19:880-886. 1965.
- DICKERSON, Jr. R.W. & REED, Jr. R.B. Calculation and measurement of heat transfer in foods. *Food Technology*, 22: 1533-1535 e 1547-1548. 1968.
- FAO. *Fao production yearbook* 1976. Rome, v. 30 1977.
- FORD, R.M. & BILANSKI, W.K. Thermal diffusivity of alfalfa stems. *Transactions of the ASAE*, 12 (2): 249-251. 1969.
- KAZARIAN, E.A. & HAL, C.W. Thermal properties fo grain. *Transactions of the ASAE*, 8 (1): 33-38. 1965.
- MARAVILHAS, N. Novo tipo de conjunto secador para cacau fermentado. *cacau atualidades*, 13(3): 6-9. 1976.
- MATTHEWS, Jr. F.V. & HALL, C.W. Method of finite differences used to relate changes in thermal and physical properties of potatoes. *Transaction of the ASAE*, 11(4): 558-562 e 565. 1968.
- MOYSEY, E.B.; SHAW, J.T. & LAMPMAN, W.P. The effect of temperature and moisture on the thermal properties of rapeseed. *Transactions of the ASAE*, 24(4): 768-771. 1977.
- NIX, G. H.; LOWERY, G.W.; VACHON, R.I. & TANGER, G.E. Direct determination of thermal diffusivity and conductivity with a refined limesource technique, In: *Progress in Aeronautics and Astronautics. Thermophysics of spacecraft and planetary bodies*, Academic Press, New York. v. 20 p. 865-878. 1967.
- ONU, Department of Economic and Social Affairs. *Yearbook of international trade statistics* 1976. New York, v. 2. 1977.
- OTT, L.E. & HURLBUT, L.W. *Thermal diffisivity of compressed alfalfa hay*. ASAE, 8 p. (Paper nº 64-817, apresentado no Encontro Anual da American Society of Agricultural Engineers, 1967). 1964.
- RAO, M. A.; BARNARD, J. & KENNY, J. F. Thermal conductivity of process variety squash and sweet potatoes. *Transactions of the ASAE*, 18(6): 1188-1192. 1975.
- SUTTER, D.A.; AGRAMAL, K.K. & CLARY, B.L. Thermal properties of peanut pods, hulls and kernels. *Transactions of the ASAE*, 18(2): 370-375. 1975.
- WATIS, K.C. & BILANSKI, W.K. Method for estimation the themal diffusivity of whole soybeans. *Transactions of the ASE*, 16(6): 1143-1145. 1973.
- WRATTEN, F.T.; POOLE, W.D.; CHESNESS, J.L.; BAL, S. & BARNARD, V. Physical and thermal properties of rough rice. *Transactions of the ASAE*, 12(6): 801-803. - 1969.