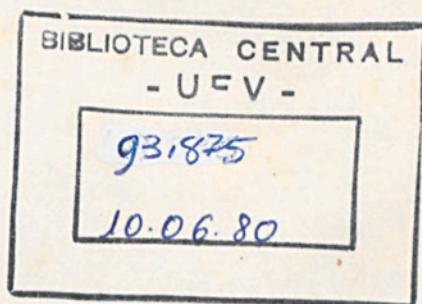


DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS DE AMÊNDOAS
DE CACAU (Theobroma cacao, L.)

por

BENTO VILAR DE ALMEIDA



Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de Engenharia
Agrícola, para a Obtenção do Grau
de "Magister Sciencie".

T
633.746
A447d
1979
ex.1

VIÇOSA - MINAS GERAIS

1979

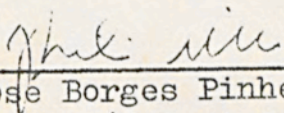
DOAÇÃO

DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS DE AMENDOAS
DE CACAU (Theobroma cacao, L.)

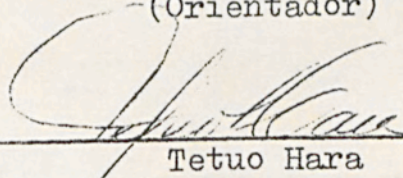
por

BENTO VILAR DE ALMEIDA

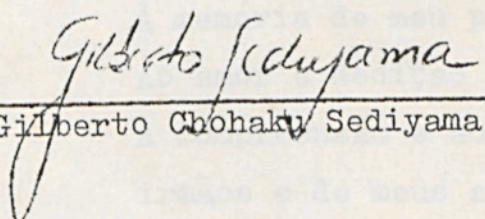
APROVADA:



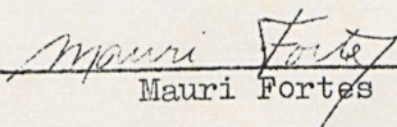
Jose Borges Pinheiro Filho
(Orientador)



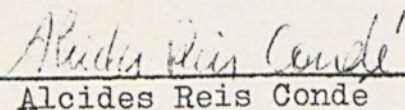
Tetuo Hara



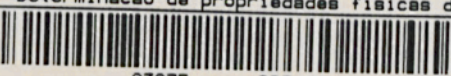
Gilberto Chohaku Sedyama



Mauri Fortes



Alcides Reis Conde

UFV	BIBLIOTECA	BBT	OBRA	RG000279888
	CLASSIFICAÇÃO T 633.746 / A447d			
TÍTULO Determinação de propriedades físicas de am				
				
93875		BBT		

Dedido este trabalho, inteiramente:
 À memória de meu pai
 Ao amor e dedicação de minha mãe
 À compreensão e ao incentivo de meus
 irmãos e de meus amigos.

BIOGRAFIA DO AUTOR

BENTO VILAR DE ALMEIDA, filho de Francisco Chagas de Almeida e de Iraci Vilar Nóbrega de Almeida, nasceu em Santa Luzia, Paraíba, aos 21 dias do mês de abril de 1941. Em 1973, colou grau de Bacharel e Licenciado em Física, na Faculdade de Ciências, Letras e Pedagogia da Universidade Mackenzie, em São Paulo. Em agosto de 1975, ingressou no curso de Pós-Graduação, em Engenharia Agrícola, a nível de Mestrado, na Universidade Federal de Viçosa.

Aos professores Alcides Reis Condé, Fábio Ribeiro Gomes (in memoriam) e Gilberto C. Sedyama pela valiosa colaboração.

Aos eminentes técnicos senhores José Marccondes Borges e Paulo Alvim pela relevante contribuição.

Ao Sr. Alvaro Alberto Leitão, pela valiosa colaboração.

Aos professores Avelino Mantovani, Fernando Camelier, Jadir Aguiar da Silva, José Roberto Correa Saglietti, Luigi Tomazini, Luiz Carlos de Alvarenga, Ma Ming Tsong e Oderli de Aguiar pela preciosa colaboração.

Aos professores do Departamento de Física da U.F.V. pela ajuda e cooperação.

Ao laboratorista, Sr. Antonio Silvestre Brustoline, ao

AGRADECIMENTOS

Ao concluir o presente trabalho desejo expressar meus a gradecimentos:

Ao professor José Borges Pinheiro Filho pelo integral apoio e orientação, durante o curso e a realização da pesqui sa.

Ao professor Tetuo Hara pelo apoio decisivo, durante to do o planejamento e execução do trabalho.

Ao professor Mauri Fortes pela dedicação inigualável em prol do aperfeiçoamento deste trabalho.

Aos professores Alcides Reis Condé, Fábio Ribeiro Gomes (in memoriam) e Gilberto C. Sedyiyama pela valiosa colabora ção.

Aos eminentes técnicos senhores José Marcondes Borges e Paulo Alvim pela relevante contribuição.

Ao Sr. Álvaro Alberto Leitão, pela valiosa colaboração.

Aos professores Avelino Mantovani, Fernando Camelier, Jadir Nogueira da Silva, José Roberto Correa Saglietti, Lui- gi Toneguzzo, Luiz Carlos de Alvarenga, Ma Ming Tsomg e Oder li de Aguiar pela preciosa colaboração.

Aos professores do Departamento de Física da U.F.V. pelo apoio e cooperação.

Ao laboratorista, Sr. Antonio Silvestre Brustoline, ao

vi

Página

1.2. Determinação da Massa Específica 18

1.2.1. Massa Específica Aparente 18

1.2.2. Massa Específica Real 28

1.3. Determinação da Condutividade Térmica 19

1.3.1. Equipamento 19

1.3.2. Condutividade Térmica Aparente 21

1.4. Calor Específico 25

1.4.1. Calibração do Calorímetro 25

1.4.2. Determinação do Calor Específico na

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE QUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
EXTRATO	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Problema	1
1.2. Objetivos	2
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Porosidade e Massa Específica	4
2.1.1. Definição	4
2.1.2. Métodos Normalmente Usados	5
2.2. Condutividade Térmica e Difusividade Térmica	5
2.2.1. Definição	5
2.2.2. Métodos Normalmente Usados	8
2.3. Calor Específico	9
2.3.1. Definição	9
2.3.2. Métodos Normalmente Usados	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1. Porosidade	16
3.1.1. Calibração do Picnômetro	16
3.1.2. Determinação da Porosidade da Massa Granular das Amêndoas de Cacau	18

Página

3.2. Determinação da Massa Específica	18
3.2.1. Massa Específica Aparente	18
3.2.2. Massa Específica Real	18
3.3. Determinação da Condutividade Térmica	19
3.3.1. Equipamento	19
3.3.2. Condutividade Térmica Aparente	21
3.4. Calor Específico	25
3.4.1. Calibração do Calorímetro	25
3.4.2. Determinação do Calor Específico pa ra Amêndoas	26
3.5. Determinação da Difusividade Térmica Apa- rente das Amêndoas	27
3.6. Fontes de Erro	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1. Porosidade	30
4.2. Massa Específica	34
4.2.1. Massa Específica Aparente	34
4.2.2. Massa Específica Real	34
4.3. Condutividade Térmica Aparente das Amêndoas	37
4.4. Calor Específico das Amêndoas	37
4.5. Difusividade Térmica Aparente das Amêndoas	40
5. RESUMO E CONCLUSÕES	42
6. LITERATURA CITADA	45
7. APÊNDICE	52

LISTA DE QUADROS

Quadro		Página
1	Porosidade de produtos agrícolas	6
2	Massa específica de produtos agrícolas ..	7
3	Condutividade térmica de diversos produ - tos	10
4	Difusividade térmica de produtos vegetais e animais	11
5	Calor específico de produtos agrícolas ..	14
6	Equações de regressão, ajustadas para as propriedades físicas da massa granular de cacau, em função do teor de umidade	31
7	Equações de regressão, ajustadas para as propriedades físicas da massa granular de cacau, em função da massa específica apa- rente	32
8	Variação da condutividade térmica aparente das amostras de cacau, com o teor de umida de	36
9	Variação do calor específico das amostras de cacau, com o teor de umidade	39
10	Variação da difusividade térmica aparente das amostras de cacau, com o teor de umida de	41

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Esquema do picnômetro	17
2	Determinador experimental de condutividade térmica	20
3	Termopar, usado na determinação da condutividade térmica	22
4	Variação da temperatura, com o tempo, para medidas de condutividade térmica	24
5	Variação da porosidade da massa granular de amêndoas de cacau, com o teor de umidade	33
6	Variação da massa específica aparente das amêndoas de cacau, com o teor de umidade .	35
7	Variação da massa específica real das amêndoas de cacau, com o teor de umidade	36
8	Variação da condutividade térmica aparente das amêndoas de cacau, com o teor de umidade	38
9	Variação do calor específico das amêndoas de cacau, com o teor de umidade	39
10	Variação da difusividade térmica aparente das amêndoas de cacau, com o teor de umidade	41

LISTA DE SÍMBOLOS

- A = termo de correção de temperatura, com valor positivo ($^{\circ}\text{C}$)
- $a, b, c,$ = parâmetros de regressão
- $b.s.$ = base seca
- $b.u.$ = base úmida
- C = capacidade térmica do calorímetro ($\frac{\text{J}}{^{\circ}\text{C}}$)
- c = calor específico ($\frac{\text{J}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}}$)
- c_p = calor específico das amêndoas, a pressão constante ($\frac{\text{J}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}}$)
- c'_p = calor específico da água fria, a pressão constante ($\frac{\text{J}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}}$)
- c_{pq} = calor específico da água quente, a pressão constante ($\frac{\text{J}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}}$)
- K_a = condutividade térmica aparente das amêndoas ($\frac{\text{W}}{\text{m } ^{\circ}\text{C}}$)
- K_t = condutividade térmica ($\frac{\text{W}}{\text{m } ^{\circ}\text{C}}$)
- m = massa de água quente (kg)
- m_a = massa de amêndoas (kg)

- m' = massa de água fria (kg)
 P = porosidade estimada (%)
 P_c = porosidade corrigida (decimal)
 P_o = porosidade observada (%)
 Q' = potência dissipada por unidade de comprimento da fonte ($\frac{W}{m}$)
 R^2 = coeficiente de determinação (adimensional)
 T_1 = temperatura do sistema, após a primeira fase ($^{\circ}C$)
 T_2 = temperatura da água fria ($^{\circ}C$)
 T_3 = temperatura do sistema, após a segunda fase ($^{\circ}C$)
 T_4 = temperatura das amêndoas ($^{\circ}C$)
 T = temperatura ($^{\circ}C$)
 T_a = temperatura ($^{\circ}F$)
 T_f = temperatura final do intervalo usado para determinar a condutividade térmica ($^{\circ}C$)
 T_i = temperatura inicial do intervalo usado para determinar a condutividade térmica ($^{\circ}C$)
 T_p = temperatura ($^{\circ}C/100$)
 t_o = termo de correção de tempo, com valor negativo (s)
 t_1 = instante inicial do intervalo usado para determinar a condutividade térmica (s)
 t_2 = instante final do intervalo usado para determinar a condutividade térmica (s)
 U = teor de umidade, decimal (b.u.)*
 U_s = teor de umidade, decimal (b.s.)
 V_a = volume aparente (m^3)
 V_r = volume real (m^3)

$$* U = \frac{U_s}{1 + U_s}$$

α = difusividade térmica aparente das amêndoas $\left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)$

ρ_a = massa específica aparente $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

ρ_r = massa específica real $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

RESUMO

ALMEIDA, Bento Valente de S. S. Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 1979. Estudo das propriedades físicas de amêndoas de cacau (Theobroma cacao, L.). Professor Orientador: José Borges Pinheiro Filho. Professores Conselheiros: Tetuo Hara e Gilberto C. Sedyasa.

Porosidade, massa específica aparente e real, condutividade térmica aparente, calor específico e difusividade térmica aparente de amêndoas de cacau foram determinados experimentalmente, à temperatura de 16°C e teor de umidade no intervalo de 6% (b.s.) a 105% (b.s.). A condutividade térmica foi determinada pelo método transitório, o calor específico pelo processo das misturas e a difusividade térmica a partir dos valores experimentais de condutividade térmica, calor específico e massa específica aparente; a porosidade foi determinada nos pnenômetros de comparação a ar. Observou-se que a condutividade térmica, o calor específico e a massa específica aparente variam linearmente com o teor de umidade das amêndoas; a porosidade decresce linearmente com o aumento do teor de umidade, e a difusividade térmica varia segundo uma função quadrática com o teor de umidade, com mínimo em 45% (b.s.).

EXTRATO

ALMEIDA, Bento Vilar de. M.S., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 1979. Determinação de propriedades físicas de amêndoas de cacau (*Theobroma cacao*, L.). Professor Orientador: José Borges Pinheiro Filho. Professores Conselheiros: Tetuo Hara e Gilberto C. Sedyama.

Porosidade, massa específica aparente e real, condutividade térmica aparente, calor específico e difusividade térmica aparente de amêndoas de cacau foram determinados experimentalmente, à temperatura de 18°C e teor de umidade no intervalo de 0% (b.s.) a 106% (b.s.). A condutividade térmica foi determinada pelo método transitório, o calor específico pelo processo das misturas e a difusividade térmica a partir dos valores experimentais de condutividade térmica, calor específico e massa específica aparente; a porosidade foi determinada num picnômetro de comparação a ar. Observou-se que a condutividade térmica, o calor específico e a massa específica crescem linearmente com o teor de umidade das amêndoas; a porosidade decresce linearmente com o aumento do teor de umidade, e a difusividade térmica varia segundo uma função quadrática com o teor de umidade, com mínimo em 48% (b.s.).

1. INTRODUÇÃO

1.1. Problema

O progresso da ciência, em qualquer área de conhecimento, é função da descoberta de novos parâmetros que regem a manifestação dos fenômenos em estudo. O desenvolvimento da Ciência da Engenharia, em particular, está na dependência direta da descoberta e explicação das propriedades físicas dos materiais.

A determinação das propriedades físicas de materiais biológicos é um dos fatores decisivos em pesquisas e projetos de equipamentos de manuseio, transporte, seleção e processamento de produtos agrícolas. A aplicação de tais propriedades, no entanto, apresenta inúmeras restrições, pois variam segundo as condições ambientes, variedade e tipo de grãos, localização e fertilidade de solos, práticas agrícolas empregadas e período de armazenamento.

Informações concernentes a tamanho e forma, massa específica e porosidade são parâmetros considerados relevantes em estudos de hidrodinâmica, aerodinâmica e transferência de calor e massa em volume de grãos. Juntamente com o teor de umidade, a massa específica é utilizada para determinar condições de armazenamento e o grau de comercializa-

ção do produto. O conhecimento das propriedades térmicas, por outro lado, é essencial para pesquisadores e projetistas, no campo da Tecnologia e da Engenharia 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.

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 agrária brasileira. Particularmente em relação à lavoura cacauera, e, segundo dados publicados pela FAO (16) e pela ONU (39), a área colhida de cacau no Brasil, em 1976, foi de $4,87 \times 10^5$ ha, com uma produção de $2,33 \times 10^5$ t.

O Brasil ocupou, no ano de 1974, o 2.^o lugar entre os principais exportadores mundiais desse produto, quando realizou negócios superiores a 293 milhões de dólares. No ano de 1975, ocupou o 2.^o lugar, entre os principais produtos mundiais de cacau.

A secagem artificial de cacau, entretanto, constitui ainda um setor de experimentação, em fase de desenvolvimento. Além de não constarem na literatura relatos definitivos sobre as condições limites de secagem, os poucos trabalhos divulgados são ainda contraditórios. Estudos sobre as propriedades físicas das amêndoas de cacau, antes e depois da fermentação nunca foram executados (29).

1.2. Objetivos

1. Determinar a condutividade térmica, a difusividade

de térmica, e a massa específica aparentes, o calor específico, a porosidade e a massa específica real de amêndoas de cacau para diversos teores de umidade, à temperatura ambiente de 18°C .

2. Ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais, em função do teor de umidade.

3. Ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais de condutividade térmica e difusividade térmica aparentes, calor específico e porosidade, em função da massa específica aparente.

2.1.1. Definição

Porosidade

Denomina-se porosidade a relação entre o volume ocupado pelo ar existente em massa granular, e o volume total ocupado pela massa massa.

Massa Específica

Denomina-se massa específica de um material a razão entre a massa e o volume do material. A massa específica é dita aparente, quando se refere ao volume total ocupado pela massa granular (volume do sólido mais o do ar intergranular). A massa específica real refere-se ao volume real (volume total menos o do ar intergranular), ocupado pela massa granular.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Porosidade e Massa Específica

2.1.1. Definição

Porosidade

Denomina-se porosidade a relação entre o volume ocupado pelo ar existente em massa granular, e o volume total ocupada pela mesma massa.

Massa Específica

Denomina-se massa específica de um material a razão entre a massa e o volume do material. A massa específica é dita aparente, quando se refere ao volume total ocupado pela massa granular (volume do sólido mais o do ar intergranular). A massa específica real refere-se ao volume real (volume total menos o do ar intergranular), ocupado pela massa granular.

2.1.2. Métodos Normalmente Usados

Os principais métodos usados na determinação da porosidade e da massa específica dos materiais são:

1. Descolamento de líquidos
2. Deslocamento de gases
3. Interação da radiação com a matéria
4. Na determinação da massa específica aparente usa-se a relação entre a massa do material e o volume total ocupado pela mesma massa.

Os métodos acima são descritos em DAY (9), GUSTAFSON e HALL (20) e MOHSEIN (32).

Os Quadros 1 e 2 relacionam, respectivamente, valores de porosidade e de massa específica para diversos produtos agrícolas obtidos na literatura.

2.2. Condutividade Térmica e Difusividade Térmica

2.2.1. Definição

Condutividade Térmica

Denomina-se condutividade térmica real (ou coeficiente de condutibilidade térmica), a taxa de calor que flui por condução, por unidade de tempo, normal a uma superfície de área unitária, quando se estabelece um gradiente de temperatura, $\frac{dT}{dX}$, entre duas superfícies paralelas e de espessura unitária. A condutividade térmica é denominada aparente (ou efetiva) quando são incluídos outros mecanismos de transmissão de calor.

QUADRO 1 - Porosidade de produtos agrícolas (%)

Produto	Faixa de teor de unidade % (b.s.)	Faixa de temperatura °C	Valor ou expressão	Método	Referência
Alfafa	-	-	Gráfico *	2	9
Arroz ¹	14 - 22	-	69,05 - 88,5U	2	55
Arroz ²	14 - 22	-	65,55 - 47,5U	2	55
Aveia	-	-	101,23 - 4,944 x 10 ⁻² ρ _a .	2	51 ⁺⁺
Cacau	9,63 - 114,50	80	54,0655 (0,9981) U ^s	2	41
Milho	1 - 37	Ambiente	101 - 7,8 x 10 ⁻² ρ _a	2	7
Milho	9 - 52	-	94,92 - 4,64 x 10 ⁻² ρ _a	2	20 ⁺
Trigo	1 - 23	Ambiente	90 - 5,8 x 10 ⁻² ρ _a	2	7

1 Grãos médios.

2 Grãos longos.

* Apresentou o gráfico (uma reta) da porosidade em função da massa específica aparente.
 + O autor apresenta outros gráficos, relacionando a porosidade com o teor de umidade e a massa específica aparente, para diferentes condições de secamento.

++ O autor incluiu outros resultados para trigo, sorgo, soja, centeio, cevada, alfafa e milho.

Produto	Faixa de teor de umidade % (b.s.)	Faixa de temperatura °C	Valor ou expressão	Método	Referência
Abóbora	733 - 1567	25	900 - 970	-	42
Arroz ¹	14 - 22	-	4,997 x 10 ² + 8,33 x 10 ² U	2	55
Arroz ²	14 - 22	-	5,1945 x 10 ² + 5,29 x 10 ² U	2	55
Batata branca	456	25	1040 - 1050	-	42
Cevada ⁺	18 - 100	-	1,352 x 10 ³ - 3,16 x 10 ² U	2	3**
Cevada	18 - 100	-	7,054 x 10 ² - 1,142 x 10 ³ U ^s + + 1,95 x 10 ³ U ^s	4	3**
Colza granular	1 - 25	-26 - 19	Gráficos*	4	34
Colza granular	4 - 11	-	650 - 720	-	34
Frutas e legumes	183 - 207	24 - 29	790 - 1590	1	49
Milho ⁺	1 - 37	Ambiente	1,328 x 10 ³ - 1,63 x 10 ² U	2	7
Milho ⁺	7 - 53	-	1,3704 x 10 ² - 2,8 x 10 ² U ^s	2	20 ⁺⁺
Milho	1 - 43	20,8 - 52,6	754 - 680,9	4	27
Salada de batata	-	-	1010	-	10
Soja	8 - 36	Ambiente	1230	1	52
Sorgo	2 - 43	4	Gráfico*	4	45
Trigo ⁺	1 - 23	Ambiente	1,444 x 10 ³ - 2,61 x 10 ² U	2	7
Trigo	1 - 25	21,5 - 44,1	772,2 - 741,7	4	27

* Os valores observados distribuíram-se irregularmente.

** O autor apresenta outros resultados para centeio, milho, soja, trigo, aveia e sorgo.

+ Massa específica real.

++ O autor apresenta outros resultados para diferentes temperaturas de secamento.

1 Grãos médios.

2 Grãos longos.

Difusividade Térmica

A difusividade térmica é definida (18) como a variação de temperatura que pode ser produzida num volume unitário de uma substância, pela quantidade de calor que flui na unidade de tempo por uma área unitária de uma camada da substância, de espessura unitária, com um gradiente unitário de temperatura entre as faces.

2.2.2. Métodos Normalmente Usados

Basicamente os métodos usados para determinação da condutividade térmica e da difusividade térmica dos materiais são:

1. Método estacionário
2. Método transitório
3. Resolvendo a equação

$$\alpha = \frac{K}{c \rho} \quad (1)$$

onde:

- α = difusividade térmica
- K = condutividade térmica
- c = calor específico
- ρ = massa específica

Na equação 1, os valores de K , ρ e c , ou ρ , α e c são determinados experimentalmente.

Uma completa revisão destes métodos foi feita por REIDY e RIPPEN (43). O método estacionário consiste basicamente em resolver equação de condução de calor, para transferência de calor em estado estacionário, em placas parale-

las, cilindros concêntricos e esferas concêntricas (19). REYDY e RIPPEN (43) relacionaram alguns dos motivos que não re comendam o emprego desse método, em pesquisas com materiais biológicos. WOODAMS e NOWREY (54) relacionaram valores de condutividade térmica de vários produtos alimentícios, e apresentaram breve discussão dos métodos empregados. Hooper e Lepper, citados por KAZARIAN e HALL (27) foram dos primeiros pesquisadores a utilizar o método transitório para determinar a condutividade térmica de sólidos. Este método consiste em introduzir no material uma fonte linear de calor (resistor eletricamente aquecido) e medir o incremento de temperatura com termopar próximo ao ponto médio da fonte.

NIX et alii (37) utilizaram a técnica iterativa de Newton-Raphson, para determinação simultânea da condutividade térmica e da difusividade térmica de materiais porosos, pelo método transitório.

Foram relacionados nos Quadros 3 e 4, alguns valores de condutividade térmica e de difusividade térmica, citados na literatura.

2.3. Calor Específico

2.3.1. Definição

Capacidade Térmica

Denomina-se capacidade térmica de um corpo, a razão entre o calor fornecido ao corpo, e a correspondente variação de temperatura.

Produto	Faixa de teor de umidade % (b.s.)	Faixa de temperatura $^\circ C$	Valor ou expressão	Método	Referência
Abóbora	-	25	0,471 - 0,533	2	42
Amendoim	6,3 - 75	24	$1,04 \times 10^{-1} + 8,65 \times 10^{-4} U_B$	2	48
Arroz	13,7 - 25	-	$8,6523 \times 10^{-2} + 1,327 \times 10^{-4} U$	2	55
Aveia	9,9 - 38,3	-	0,0640 - 0,0929	1	27
Aveia	14,2	-	0,130	1	27
Batata branca	456	25	0,533 - 0,571	2	42
Carne de galinha	320	-35 - 2	0,519	CT	23
Carne de galinha	286	0 - 20	$0,476 + 6,05 \times 10^{-4} T$	2	50
Carne de galinha	286	-75 - -10	$1,07 - 1,497 \times 10^{-2} T + 1,04 \times 10^{-4} T^2$	2	50
Colza granular	1 - 25	-26	$8,63 \times 10^{-2} - 1,052 \times 10^{-1}$	2	34
Colza granular	1 - 25	19	$9,69 \times 10^{-2} - 1,197 \times 10^{-1}$	2	34
Colza granular	6,4 - 15,2	4,4 - 31,7	0,1082 - 0,1608	2	2
Colza moída	6,4 - 15,2	4,4 - 31,7	0,0625 - 0,0881	2	2
Frutas e legumes	180 - 2070	24 - 29	$0,148 + 4,93 \times 10^{-3} U$	2	49
Leite em pó	3,5 - 12	46,1 - 68,3	$0,4932 - 6,50 \times 10^{-4} T + 1,85 \times 10^{-2} U$	2	6
Milho	15,2	-	0,176	1	27
Milho	1 - 43	20,8 - 52,6	$1,41 \times 10^{-1} + 1,118 \times 10^{-3} U$	2	27
Milho	17,6 - 27	30,5 - 83,5	$\ln(K_t) = -1,738 - 3,696 U_B + 4,725 \times 10^{-2} T + 6,843 U_B^2 - 1,499 \times 10^{-4} T^2 + 6,272 \times 10^{-4} U_B T$	2	19
Pele de galinha	150	-25 - 2	0,493	CT**	23
Soja	8,9 - 35,5	20 - 50	Gráficos**	3	52
Soja granular	11,4	4,4 - 71,1	Gráfico*	2	26
Soja moída	11	4,4 - 71,1	Gráfico**	2	26
Solos	-	20	Gráficos*	2	47
Sorgo	2 - 41	21,1 - 37,8	$9,76 \times 10^{-2} + 1,484 \times 10^{-2} U$	2	45
Trigo	4,5 - 29	-27	0,1436 - 9,55U	2	5
Trigo	4,5 - 29	20	0,1398 + 14,1U	2	5
Trigo	10	26,1 - 48,9	0,640	1	27
Trigo	13,2 - 21,6	-	0,151 - 0,159	1	27
Trigo	1 - 43	21 - 44,1	$1,17 \times 10^{-4} + 1,131 \times 10^{-3} U$	2	27

* Funções lineares da temperatura.
 ** Funções quadráticas da temperatura.
 † Funções quadráticas da porosidade.
 †† Funções quadráticas do teor de umidade.
 ††† Comparador térmico.

QUADRO 4 - Difusividade térmica de produtos vegetais e animais ($\frac{m^2}{s}$)

Produto	Faixa de teor de umidade % (b.s.)	Faixa de temperatura °C	Valor ou expressão	Método	Referência
Abóbora	733 - 1567	25	$1,47 \times 10^{-7}$ - $1,63 \times 10^{-7}$	2	42
Alfafa	88,6 - 141	20 - 80	$2,84 \times 10^{-4}$ - $4,14 \times 10^{-4}$	2	18
Alfafa	890	29,4 - 46,1	$6,01 \times 10^{-7}$ - $2,1 \times 10^{-8}$	2	40
Amendoim moído	8	7,2 - 37,8	$2,05 \times 10^{-7}$ - $1,579 \times 10^{-9}T$	2	48
Arroz	13,7 - 25	-	$1,35 \times 10^{-7}$ - $2,49 \times 10^{-7}U$	3	55
Batata	-	24,4	$1,632 \times 10^{-7}$ - $2,905 \times 10^{-9}D^*$	2	30
Batata branca	456	25	$1,65 \times 10^{-7}$ - $1,84 \times 10^{-7}$	2	42
Batata doce sólida	-	Ambiente	$1,290 \times 10^{-7}$	2	8
Carne de galinha	-	76,7	$1,51 \times 10^{-7}$	2	11
Colza granular	1 - 25	-26	$1,035 \times 10^{-7}$ - $9,78 \times 10^{-8}$	2	34
Colza granular	1 - 25	19	$9,96 \times 10^{-8}$ - $9,60 \times 10^{-8}$	2	34
Milho	1 - 43	20,8 - 52,6	$1,02 \times 10^{-7}$ - $9,2 \times 10^{-8}$	2	27
Purê de batata	-	Ambiente	$1,388 \times 10^{-7}$	2	8
Salada de batata	-	1,7 - 71,1	$1,46 \times 10^{-7}$	2	10
Soja	8,7 - 67	20 - 50	$4,5 \times 10^{-8}$	2	53
Trigo	1 - 43	21 - 44,1	$9,0 \times 10^{-8}$ - $8,0 \times 10^{-8}$	2	27

* D = período de armazenagem (horas).

Calor Específico

O calor específico de um corpo é definido como a razão entre a capacidade térmica e a massa do corpo.

2.3.2. Métodos Normalmente Usados

Os principais métodos usados na determinação do calor específico são:

1. A relação entre a condutividade térmica, a massa específica e a difusividade térmica.
2. O processo das misturas.
3. Calorímetro de varredura diferencial.
4. Calorimetria de gelo.
5. Bomba calorimétrica.

O método 1 consiste em determinar inicialmente a condutividade térmica, a massa específica e a difusividade térmica do corpo e calcular o calor específico, usado a fórmula:

$$c = \frac{K}{\rho\alpha} \quad (2)$$

onde:

c = calor específico

K = condutividade térmica

ρ = massa específica

α = difusividade térmica

Os métodos de 2 a 5 baseiam-se no equilíbrio térmico estabelecido entre o corpo cujo calor específico se pretende determinar e um segundo corpo de calor específico conhecido.

A descrição destes métodos é encontrada em CHAKRA-BARTI e JOHNSON (4), DISNEY (12) e WRATTEN et alii (55).

O Quadro 5 relaciona valores de calor específico, de diferentes produtos agrícolas, encontrados na literatura.

DUNCAN et alii (13) utilizaram uma versão modificada da chapa quente com guarda, para determinar o calor específico de folhas de fumo, com teor de umidade variando de 25% (b.s.) a 900% (b.s.).

A relação obtida foi:

$$c = 1403 + 2395U \quad (3)$$

onde:

$$c = \text{calor específico, } \frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$$U = \text{teor de umidade, decimal (b.u.)}$$

WRIGHT e PORTERFIELD (56) determinaram o calor específico de amendoim em casca, inserindo termopares diretamente nas amêndoas colocadas numa pequena câmara aquecida por meio de corrente elétrica. Compararam os resultados com os que obtiveram simultaneamente pelo método 2 do item anterior e concluíram não haver diferença significativa, ao nível de 10% de probabilidade. Determinaram a seguinte equação para os dados obtidos pelo método das misturas:

$$c = 1687 + 1779U_s^{0,881} \quad (4)$$

onde:

$$U_s = \text{teor de umidade, decimal (b.s.)}$$

QUADRO 5 - Calor específico de produtos agrícolas ($\frac{\text{KJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$)

Produto	Faixa de teor de umidade % (b.s.)	Faixa de temperatura $^\circ\text{C}$	Valor ou expressac	Método	Referência
Amendoim em amendoais	35	4,4 - 37,8	$4,626 - 6,364 \times 10^{-2} T_e + 4,974 \times 10^{-4} T_e^2$	2	48
Amendoim em amendoais	0 - 66	32 - 57	$(-0,523 + 0,00699T)(1 - U) + C_g U$	3	57
Amendoim em casca	41 - 90	4,4 - 37,8	$2,525 - 2,127T_F + 6,238T_F^2 - 0,754U_E + 0,548U_E^2 + 5,066U_F U_E$	2	48
Arroz	11 - 21,3	-	1,574 - 1,884	4	22
Arroz	15,4 - 24,2	-	0,92143 + 5,447U	2	55
Aveia	11 - 13,7	-	1,662 - 1,951	4	22
Casca de amendoim	0 - 19,8	32 - 57	$0,711(1 - U) + C_g U$	3	57
Colza granular	1 - 25	19,4	1,356 + 3,200U	1	34
Colza granular	1 - 25	1,7	1,288 + 2,840U	1	34
Colza granular	1 - 25	-4,4	1,328 + 2,800U	1	34
Folhas de fumo	0 - 400	40 - 75	$c_{1U} + c_{2lnU} + c_{3UlnU} + c_{4T} + c_{5TlnU} + c_{6T^2} + c_{7T^2lnU}$	4	4
Folhas de fumo	25 - 900	23,9	1,403 + 2,395U	3	13
Milho	1 - 43	20,8 - 52,6	1,465 + 3,562U	2	27
Soja	0 - 40	Ambiente	1,638 + 1,929U	2	1
Soja	8 - 28,2	30 - 128	1,876	2	52
Sorgo	2 - 41	21,1 - 37,8	1,397 + 3,224U	2	45
Trigo	1,5 - 42	-33,5 - 21,8	Gráficos**	2	35
Trigo	1,4 - 50,6	-	1,264 - 2,437	4	12
Trigo	1 - 43	21 - 44,1	1,398 + 4,091U	2	27
Trigo*	0 - 19	-	1,185 + 3,031U	4	33
Trigo*	-	-	1,260 + 3,069U	4	33
Trigo**	-	-	1,206 + 3,467U	4	33

* Os grãos foram colocados em cápsulas metálicas para não absorver umidade durante os testes.

** Gráficos.

+ Amostras do mesmo ano.

** Amostras de ano diferente.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi executado no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

Foram utilizadas amêndoas de cacau (Theobroma cacao, L.) procedentes da Estação Experimental Filogônio Peixoto, operada pela CEPLAC, Linhares-ES. Tendo chegado a Viçosa em fase final de fermentação, as amêndoas foram acondicionadas em sacos plásticos e mantidas em câmara fria, em torno de 4°C , durante a execução do trabalho, a fim de minimizar as variações de suas características físicas e químicas.

Os 11 teores de umidade utilizados neste trabalho (0,8%; 2,8%; 7,6%; 14,7%; 20,8%; 23,0%; 25,0%; 34,4%; 43,3%; 74,3% e 105,4% b.s.) foram obtidos pela remoção de água em uma estufa ventilada, a $105^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, 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 de uma câmara climática (18°C e 40% de umidade relativa) 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 obtidos com amostras em torno de 25 g, pelo processo da estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 72 horas (21) com 4 repetições.

3.1. Porosidade

3.1.1. Calibração do Picnômetro

O picnômetro (Figura 1) era imerso em um tanque com água, de 300 litros, aproximadamente, onde permanecia durante 3 minutos, HARA*, com a finalidade de entrar em equilíbrio térmico com a água. Neste mesmo tanque, foi colocado um recipiente de plástico de 20 litros, cheio de água destilada. Este recipiente era mantido em uma posição flutuante, de modo a permitir que um termômetro ficasse com o bulbo imerso na água destilada para se poder acompanhar sua temperatura, durante toda a fase de calibração do picnômetro. A temperatura da água destilada variou de 21°C a 20°C , durante toda a fase de calibração. Foram estabelecidos 16 níveis de porosidade (de 100% a 0%), que correspondem aos volumes de água destilada, dentro do cilindro n.º 1 do picnômetro, variando de 0 cm^3 a $750,0\text{ cm}^3$, de $50,0$ em $50,0\text{ cm}^3$. A porosidade média foi obtida com 10 repetições em cada nível de porosidade. Entre cada duas repetições, o picnômetro era deixado novamente imerso no tanque com água, por 3 minutos. O processo de determinação de porosidade encontra-se bem descrito na referência (41). A equação de calibração foi obtida relacionando os dados de porosidade real, com os dados observados de porosidade.

* Consulta pessoal.

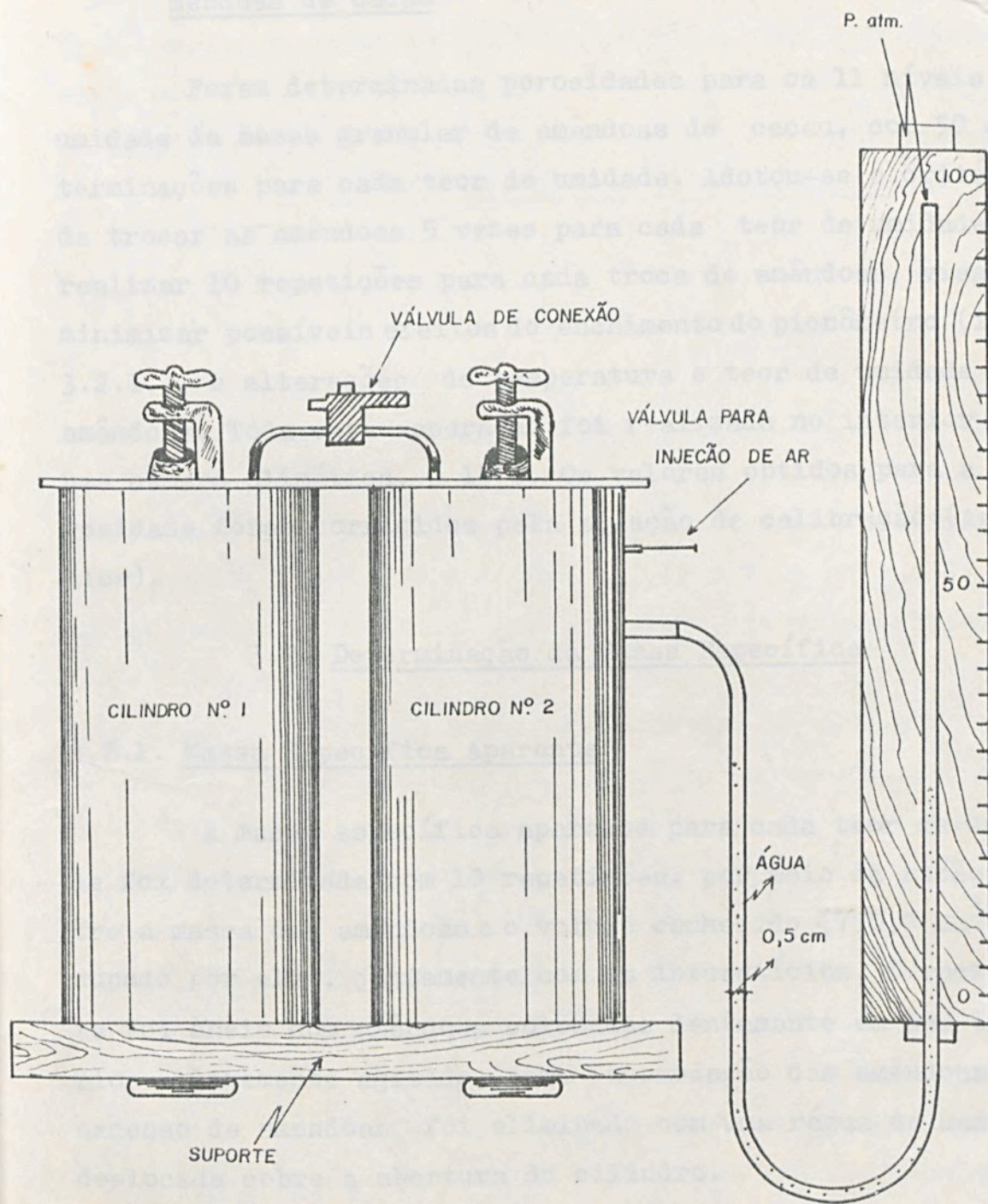


FIGURA 1 - Esquema do picnômetro.

3.1.2. Determinação da Porosidade da Massa Granular das Amêndoas de Cacau

Foram determinadas porosidades para os 11 níveis de umidade da massa granular de amêndoas de cacau, com 50 determinações para cada teor de umidade. Adotou-se o critério de trocar as amêndoas 5 vezes para cada teor de umidade, e realizar 10 repetições para cada troca de amêndoas, visando minimizar possíveis efeitos do enchimento do picnômetro (item 3.2.1.), e alterações de temperatura e teor de umidade das amêndoas. Toda esta operação foi realizada no interior de uma câmara climática, a 18°C. Os valores obtidos para a porosidade foram corrigidos pela equação de calibração (Apêndice).

3.2. Determinação da Massa Específica

3.2.1. Massa Específica Aparente

A massa específica aparente para cada teor de umidade foi determinada com 10 repetições, por meio da razão entre a massa das amêndoas e o volume conhecido (750,0 cm³), ocupado por elas, juntamente com os interstícios. O recipiente foi cheio com amêndoas colocadas lentamente em seu interior e levemente agitado, para acomodação das amêndoas. O excesso de amêndoas foi eliminado com uma régua de madeira deslocada sobre a abertura do cilindro.

3.2.2. Massa Específica Real

A massa específica real foi obtida, relacionando a massa das amêndoas com o volume real ou verdadeiro: diferença entre o volume aparente e o espaço intersticial

$(V_r = V_a (1 - P_c))$ ocupado pelas amêndoas.

Foram feitas 50 determinações de massa específica real, para cada teor de umidade, ou seja, usando o procedimento descrito no item 3.1.2.

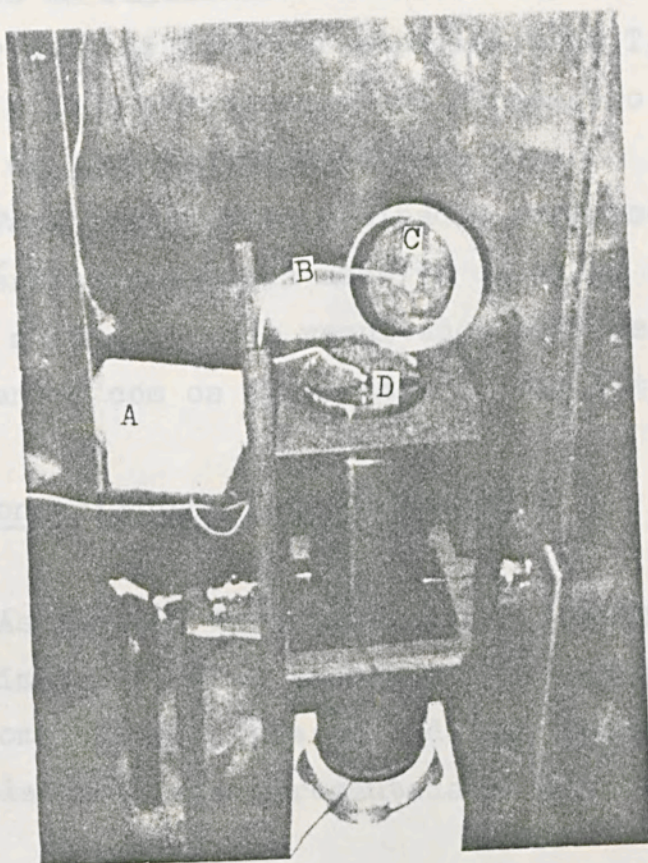
3.3. Determinação da Condutividade Térmica

3.3.1. Equipamento

Foi construído um determinador experimental de condutividade térmica, em forma cilíndrica, com 14 cm de diâmetro e 58 cm de comprimento, utilizando folhas de cobre. Estas dimensões permitem obter uma razão comprimento-diâmetro maior que 4 - conforme recomendado por NIX et alii (36) - a fim de minimizar o fluxo axial de calor. Ambas as extremidades do instrumento foram isoladas, por meio de discos de poliuretano de 3,5 cm de espessura cada um, aos quais foram adicionadas peças de isopor de 4,0 cm de espessura. No eixo do cilindro foi instalada uma fonte linear de calor, constituída por um resistor elétrico de níquel-cromo 24, de 0,56 m de comprimento, 0,051 cm de diâmetro e resistência elétrica de 5,45 Ω /m. A fonte de calor foi mantida esticada, ao longo do eixo do cilindro, por meio de um parafuso ajustável, oco, (Figura 2), através do qual passa o fio condutor soldado ao resistor. Foram testadas diversas intensidades de corrente elétrica usando um multímetro* e uma fonte regulada** com a finalidade de identificar uma variação de temperatura mais ampla, no menor intervalo de tempo, visando reduzir a

* Multímetro HINKI modelo AS-100D

** Fonte Regulada LABO FR - 1515



- A - Parte do isolamento terminal do instrumento (isopor)
- B - Fio condutor
- C - Disco de poliuretano (isolante térmico)
- D - Parafuso ajustável

FIGURA 2 - Determinador experimental de condutividade térmica.

migração de unidade no interior do material. A temperatura foi medida em regime transitório, no ponto médio da fonte de calor por meio de termopar especial tipo T, com isolamento mineral* e lida diretamente num termômetro digital**, em intervalos de 30,0 segundos (Figura 3).

Para testar o determinador experimental de condutividade térmica foi usada amostra de milho com teor de umidade igual a 15%, b.s. Os resultados obtidos foram considerados coerentes com os apresentados pela literatura (54).

3.3.2. Condutividade Térmica Aparente

As medidas de condutividade térmica das amêndoas foram realizadas para os teores de umidade já citados na seção 3, com 10 repetições em cada um, usando a equação (desenvolvida na teoria apresentada no apêndice):

$$K_a = \frac{Q'}{4 \pi (T_f - T_i)} \ln \frac{t_2 - t_0}{t_1 - t_0} \quad (5)$$

onde:

K_a = condutividade térmica aparente $\left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right)$

Q' = potência dissipada pela fonte, por unidade de comprimento $\left(\frac{W}{m}\right)$

T_i = temperatura inicial do intervalo usado para determinar a condutividade térmica ($^\circ C$)

* Fabricado pela ECIL S/A

** Numatron 923, tipo T, da LEEDS & NORTHROP

T_f = temperatura final de intervalo usado para determinar a condutividade térmica ($^{\circ}C$)

t_1 = instante inicial de intervalo usado para determinar a condutividade térmica (s)

t_2 = instante final de intervalo usado para determinar a condutividade térmica (s)

t_0 = termo de correção de tempo, com valor negativo (s)

Cada amostra de material a ser analisada é colocada no determinador de condutividade térmica, aproximadamente 10 horas antes do início de cada teste. O material é deixado na câmara climatizada até atingir o equilíbrio térmico com o meio ambiente ($18^{\circ}C$). Durante os testes, a temperatura é registrada em intervalos de 30,0 segundos. Uma corrente elétrica é fornecida ao sistema, antes de ser desligada para retornar a temperatura ao valor preliminarmente adotado para a determinação de condutividade térmica. Fez-se a leitura da tensão, em função do logaritmo do tempo, para determinar o valor do termo de correção de tempo.



A condutividade térmica aparente das amostras foi determinada, usando-se uma corrente elétrica de intensidade igual a $1,23A \pm 0,01A$. O termo de correção de tempo, t_0 , para não fosse constante, foi relacionado com o valor da condutividade térmica.

FIGURA 3 - Termopar, usado na determinação da condutividade térmica.

O intervalo de tempo usado para determinar a condutividade térmica, foi de (30,0s - 300,0s) por se apresentar o melhor coeficiente de determinação, R^2 , entre a condutividade

T_f = temperatura final do intervalo usado para determinar a condutividade térmica ($^{\circ}\text{C}$)

t_1 = instante inicial do intervalo usado para determinar a condutividade térmica (s)

t_2 = instante final do intervalo usado para determinar a condutividade térmica (s)

t_0 = termo de correção de tempo, com valor negativo (s)

Cada amostra de cacau foi colocada no determinador de condutividade térmica, aproximadamente 10 horas antes do início de cada teste. O instrumento, cheio de amêndoas foi deixado na câmara climática até o dia seguinte, para manter-se em equilíbrio térmico com o ambiente (18°C). Em todos os testes, a temperatura foi anotada, durante 10 minutos, em intervalos de 30,0 segundos, a partir do fornecimento de corrente elétrica à fonte de calor. Após cada série de medidas, manteve-se desligada a fonte, durante 1 hora, a fim de retornar à temperatura inicial. Este valor foi determinado preliminarmente e adotado em todos os testes de condutividade térmica. Fez-se a regressão dos incrementos de temperatura, em função do logaritmo natural dos intervalos de tempo, para determinar o valor do termo de correção de tempo, t_0 .

A condutividade térmica aparente das amêndoas foi determinada, usando-se uma corrente elétrica de intensidade igual a $1,23\text{A} \pm 0,01\text{A}$. O termo de correção de tempo, t_0 , embora não fosse constante, foi selecionado com valor igual a 4s (Figura 4), por ser o valor mais freqüente nos testes de condutividade térmica.

O intervalo de tempo, usado para determinar a condutividade térmica, foi de (90,0s - 300,0s) por apresentar melhor coeficiente de determinação, R^2 , entre a condutividade

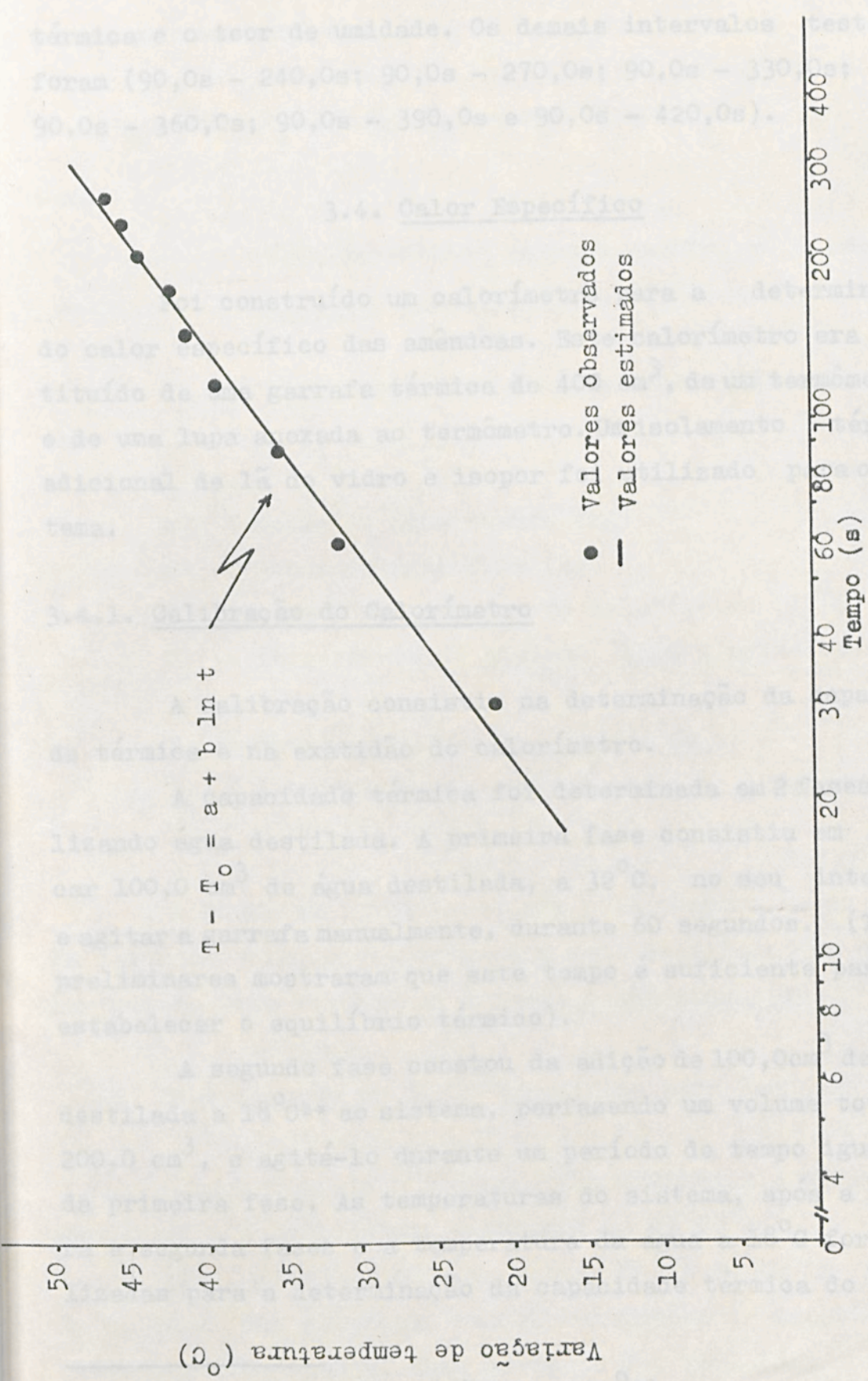


FIGURA 4 - Variação de temperatura com o tempo, para as medidas de condutividade térmica.

térmica e o teor de umidade. Os demais intervalos testados foram (90,0s - 240,0s; 90,0s - 270,0s; 90,0s - 330,0s; 90,0s - 360,0s; 90,0s - 390,0s e 90,0s - 420,0s).

3.4. Calor Específico

Foi construído um calorímetro para a determinação do calor específico das amêndoas. Este calorímetro era constituído de uma garrafa térmica de 400 cm³, de um termômetro* e de uma lupa anexada ao termômetro. Um isolamento térmico adicional de lã de vidro e isopor foi utilizado para o sistema.

3.4.1. Calibração do Calorímetro

A calibração consistiu na determinação da capacidade térmica e na exatidão do calorímetro.

A capacidade térmica foi determinada em 2 fases, utilizando água destilada. A primeira fase consistiu em colocar 100,0 cm³ de água destilada, a 32°C, no seu interior, e agitar a garrafa manualmente, durante 60 segundos. (Testes preliminares mostraram que este tempo é suficiente para se estabelecer o equilíbrio térmico).

A segunda fase constou da adição de 100,0 cm³ de água destilada a 18°C** ao sistema, perfazendo um volume total de 200,0 cm³, e agitá-lo durante um período de tempo igual ao da primeira fase. As temperaturas do sistema, após a primeira e segunda fases e a temperatura da água a 18°C foram utilizadas para a determinação da capacidade térmica do instru

* Termômetro Parr (precisão de 0,02°C)

** Termômetro Armatherm (precisão de 0,1°C)

mento, por meio da equação:

$$c_{pq} m (T_1 - T_3) + C(T_1 - T_3) = c'_p m' (T_3 - T_2) \quad (6)$$

onde:

c_{pq} = calor específico da água quente, a pressão constante $\left(\frac{J}{kg \text{ } ^\circ C}\right)$

c'_p = calor específico da água fria, a pressão constante $\left(\frac{J}{kg \text{ } ^\circ C}\right)$

m = massa de água quente (kg)

m' = massa de água fria (kg)

C = capacidade térmica do calorímetro ($J/^\circ C$)

T_1 = temperatura do sistema, após a primeira fase ($^\circ C$)

T_2 = temperatura da água fria ($^\circ C$)

T_3 = temperatura do sistema, após a segunda fase ($^\circ C$)

A exatidão foi determinada pela comparação do valor de calor específico obtido para a água destilada com o valor citado pela literatura à mesma temperatura (18).

3.4.2. Determinação do Calor Específico para Amêndoas

Foi utilizado o processo das misturas, à pressão atmosférica e à temperatura constante de $18^\circ C$.

Determinou-se o calor específico para os 11 níveis de unidade das amêndoas, com 12 repetições de amostras de 60 g, aproximadamente. Esta operação foi realizada também em 2 fases, sendo a primeira fase idêntica à primeira fase

do processo de calibração. A segunda consistiu na introdução das amêndoas no líquido calorímetro e numa agitação, durante 180 segundos (testes preliminares mostraram que este tempo é suficiente para se estabelecer o equilíbrio térmico). As massas da água e das amêndoas foram previamente determinadas* assim como a temperatura** das amêndoas. As temperaturas do sistema, depois das 2 fases, foram determinadas***.

O calor específico foi determinado por meio da equação:

$$c_{pq} m(T_1 - T_3 - A) + C(T_1 - T_3 - A) = c_p m_a (T_3 - T_4 + A) \quad (7)$$

onde:

c_p = calor específico das amêndoas, a pressão constante $\left(\frac{J}{kg \text{ } ^\circ C}\right)$

m_a = massa das amêndoas (kg)

T_4 = temperatura das amêndoas ($^\circ C$)

A = correção de temperatura para T_3 , com valor positivo ($^\circ C$)

3.5. Determinação da Difusividade Térmica Aparente das Amêndoas

A difusividade térmica aparente das amêndoas foi determinada indiretamente, usando os valores experimentais da condutividade térmica aparente, do calor específico e da massa específica aparente, na equação:

* Balança Sauter, com precisão de 0,01 g

** Termômetro Armatherm

*** Termômetro Parr

$$\alpha = \frac{K_a}{c_p \cdot \rho_a} \quad (8)$$

onde:

α = difusividade térmica aparente $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

K_a = condutividade térmica aparente $\left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right)$

ρ_a = massa específica aparente $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

c_p = calor específico a pressão constante $\left(\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}\right)$

Aplicou-se o critério de Chauvenet, citado por HUGGINS (25), para eliminar das médias as influências dos dados considerados falsos. As propriedades físicas estudadas neste trabalho foram relacionadas com o teor de umidade das amêndoas e com sua massa específica aparente, por serem estas duas grandezas relativamente fáceis de determinar, uma vez que, para fins práticos, dispensa a utilização de laboratórios aprimorados e equipamentos de elevada precisão.

3.6. Fontes de Erro

A equação 17* é válida para uma fonte de calor linear ideal, de comprimento infinito, num meio infinito. O presente experimento, no entanto, foi executado com uma amostra finita e a fonte possuía massa, raio e comprimento finitos. Desse modo, o emprego da equação 17 na determinação da condutividade térmica introduz algumas fontes de erro. Além dos erros experimentais, possivelmente afetaram os resultados:

* Apresentada no apêndice

1. Erro introduzido ao abandonar termos na equação 22* para calcular a condutividade térmica.
2. Erro introduzido pelo comprimento finito da fonte.
3. Erro causado pela natureza finita do diâmetro da fonte.
4. Erro resultante do tamanho finito da amostra.
5. Erro oriundo da resistência de contato entre a fonte de calor e o material de teste.
6. Erro introduzido na determinação da temperatura das amêndoas nos testes de calor específico.
7. Erro resultante de trocas de calor entre o calorímetro e o ambiente. Procurou-se minimizar este tipo de erro, introduzindo um termo de correção estimado.
8. Erro proveniente de possíveis variações de temperatura nos testes de porosidade.
9. O grande volume das amêndoas pode impedir o contato direto entre o termopar e o material, pelo afastamento das amêndoas do termopar, e conduzir a valores errôneos de condutividade térmica.

* Apresentada no apêndice.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Quadro 6, mostra as equações ajustadas para a porosidade, a massa específica aparente e verdadeira, a condutividade térmica aparente, o calor específico e a difusividade térmica aparente das amêndoas de cacau, em função do teor de umidade. No Quadro 7, são mostradas as equações ajustadas para a porosidade, condutividade térmica aparente, calor específico e a difusividade térmica aparente, em função da massa específica aparente.

As Figuras 5, 6, 7, 8, 9 e 10 ilustram graficamente, a variação das propriedades físicas estudadas neste trabalho, em função do teor de umidade.

4.1. Porosidade

Observa-se, na Figura 5, que a porosidade de amêndoas de cacau decresce linearmente com o aumento do teor de umidade. Uma relação linear para o arroz foi obtida por WRATTEN et alii (55). Por outro lado, GUSTAFSON e HALL (20) obtiveram uma relação quadrática para o milho. PRADO (41), no entanto, obteve uma relação exponencial para cacau em amêndoas. As relações obtidas por GUSTAFSON e HALL (20) para a porosidade de milho, em função da massa específica aparen-

QUADRO 6 - Equações de regressão ajustadas para as propriedades físicas da massa granular de ca-
cau, em função do teor de umidade. (Temperatura de trabalho de 18°C e teor de umidade
de 0% (b.s.) a 106% (b.s.))*

Propriedades físicas	Unidades	Equações ajustadas	Coefficiente de determinação R^2	Desvio padrão da regressão s
Porosidade	%	$P = 55,1 - 21,2U$	0,74	1,9
Massa específica aparente	$\frac{kg}{m^3}$	$\rho_a = 382 + 314U$	0,92	15
Massa específica real	$\frac{kg}{m^3}$	$\rho_r = 850 + 270U$	0,78	22
Condutividade térmica aparente	$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$	$K_a = 7,3 \times 10^{-2} + 1,41 \times 10^{-1}U$	0,85	9×10^{-3}
Calor específico	$\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$	$c_p = 2040 + 2870U$	0,94	120
Difusividade térmica aparente	$\frac{m^2}{s}$	$\alpha = 1,112 \times 10^{-7} - 2,216 \times 10^{-7}U + 3,41 \times 10^{-7}U^2$	0,94	$3,1 \times 10^{-9}$

* U - teor de umidade, decimal (b.u.).

QUADRO 7 - Equações de regressão para as propriedades físicas da massa granular de cacau, em funções da massa específica aparente. (Temperatura de taraballo de 18°C e teor de umidade de 0% (b.s.) a 106% (b.s.))*

Propriedades físicas	Unidades	Equações ajustadas	Coefficiente de determinação R^2	Desvio padrão da regressão s
Porosidade	%	$P = 82,2 - 0,070 \rho_a$	0,88	1,3
Condutividade térmica aparente	$\frac{W}{m \text{ } ^\circ C}$	$K_a = -7,5 \times 10^{-2} + 4,0 \times 10^{-4} \rho_a$	0,73	$1,2 \times 10^{-2}$
Calor específico	$\frac{J}{kg \text{ } ^\circ C}$	$c_p = -1100 + 8,3 \rho_a$	0,85	180
Difusividade térmica aparente	$\frac{m^2}{s}$	$\alpha = 8,531 \times 10^{-7} - 3,208 \times 10^{-9} \rho_a + 3,3 \times 10^{-12} \rho_a^2$	0,88	6×10^{-9}

* ρ_a = massa específica aparente (kg/m^3).

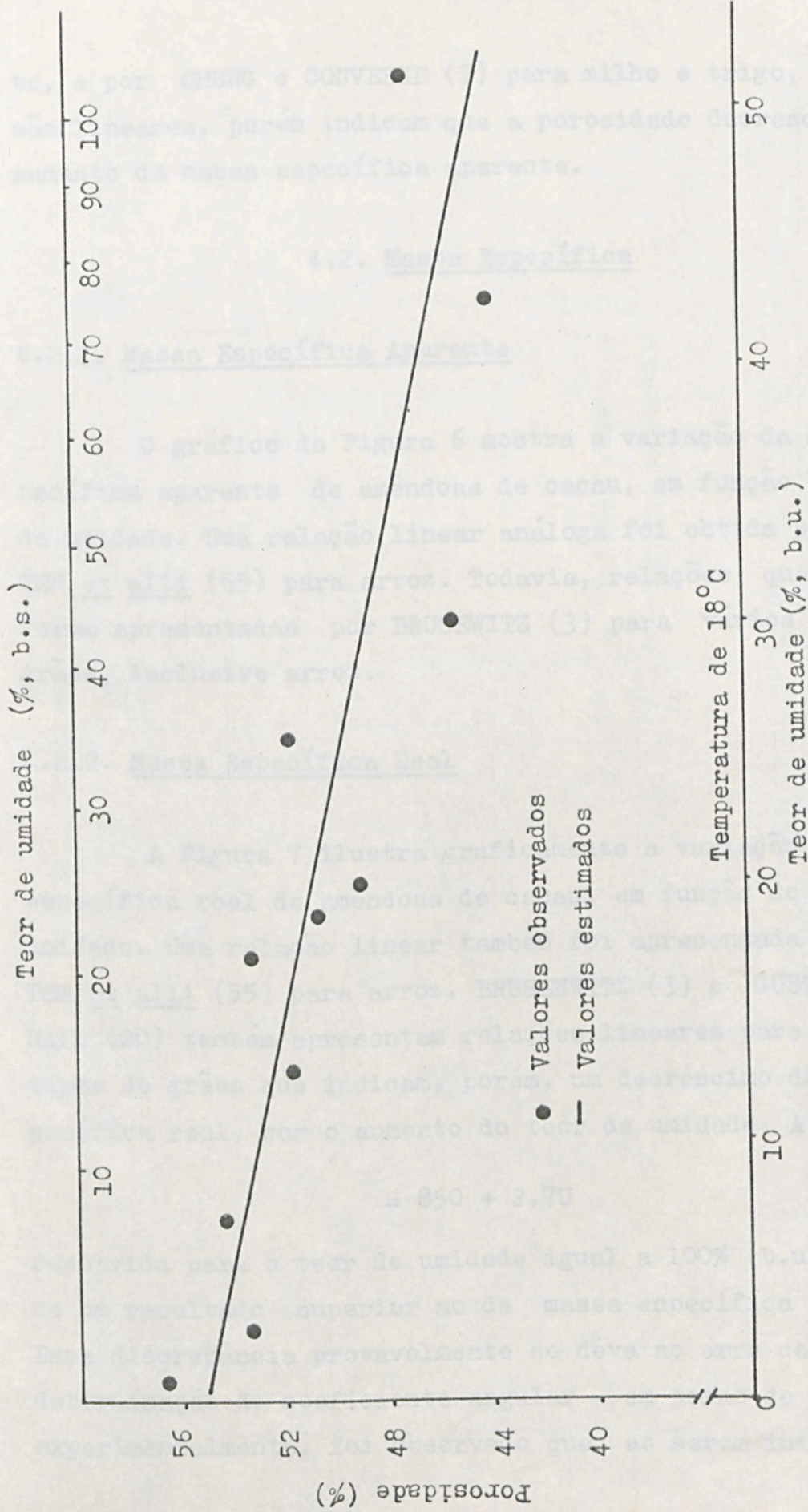


FIGURA 5 - Variação da porosidade da massa granular de amêndoas de cacau, com o teor de umidade.

te, e por CHUNG e CONVERSE (7) para milho e trigo, também são lineares, porém indicam que a porosidade decresce com o aumento da massa específica aparente.

4.2. Massa Específica

4.2.1. Massa Específica Aparente

O gráfico da Figura 6 mostra a variação da massa específica aparente de amêndoas de cacau, em função do teor de umidade. Uma relação linear análoga foi obtida por WRATTEN *et alii* (55) para arroz. Todavia, relações quadráticas foram apresentadas por BRUSEWITZ (3) para vários tipos de grãos, inclusive arroz.

4.2.2. Massa Específica Real

A Figura 7 ilustra graficamente a variação da massa específica real de amêndoas de cacau, em função do teor de umidade. Uma relação linear também foi apresentada por WRATTEN *et alii* (55) para arroz. BRUSEWITZ (3) e GUSTAFSON e HALL (20) também apresentam relações lineares para outros tipos de grãos que indicam, porém, um decréscimo da massa específica real, com o aumento do teor de umidade. A equação

$$= 850 + 2,7U$$

resolvida para o teor de umidade igual a 100% (b.u.) fornece um resultado superior ao da massa específica da água. Essa discrepância provavelmente se deva ao erro cometido na determinação do coeficiente angular - em torno de 18% pois, experimentalmente, foi observado que ao serem introduzidas

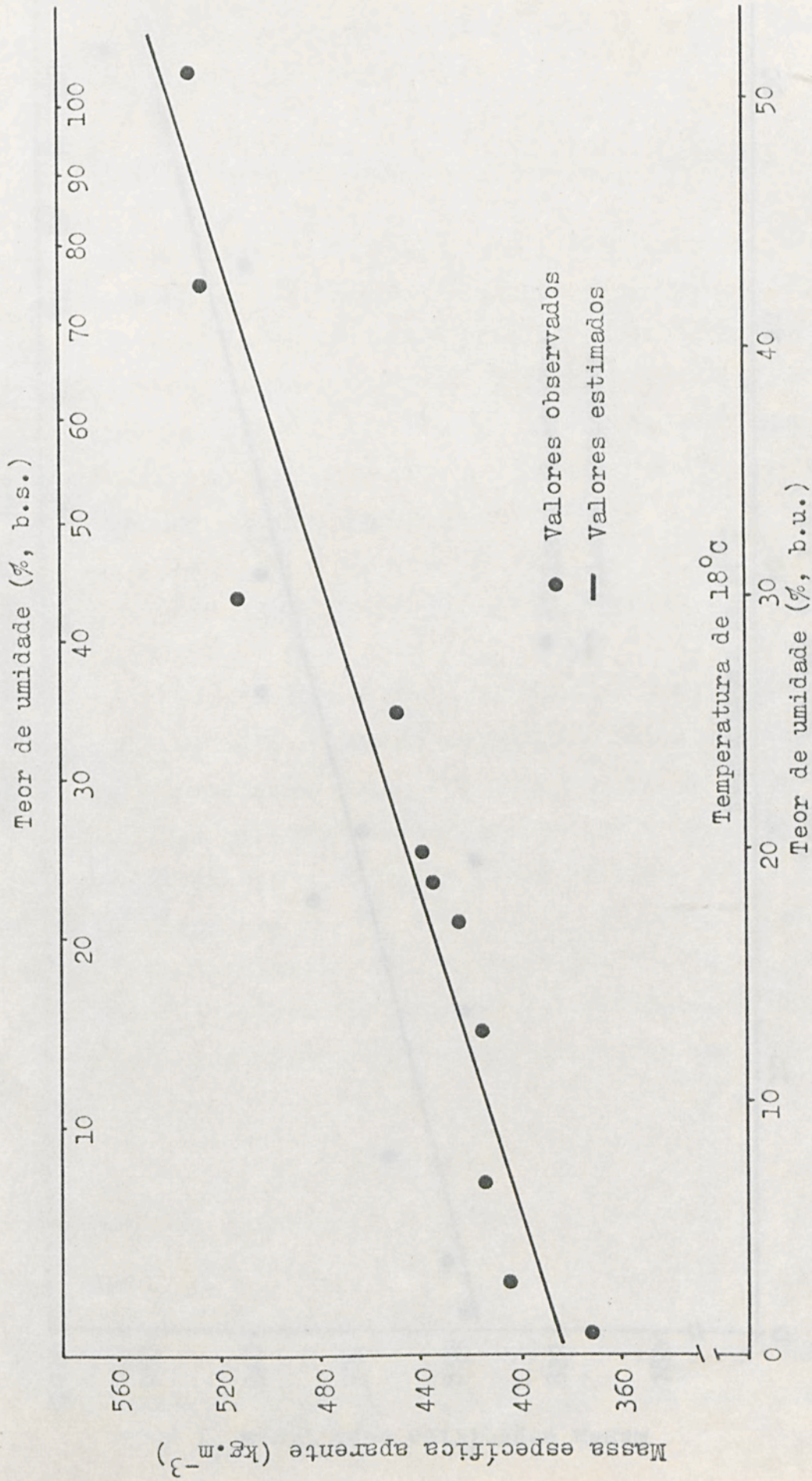


FIGURA 6 - Variação da massa específica aparente das amêndoas de cacau, com o teor de umidade.

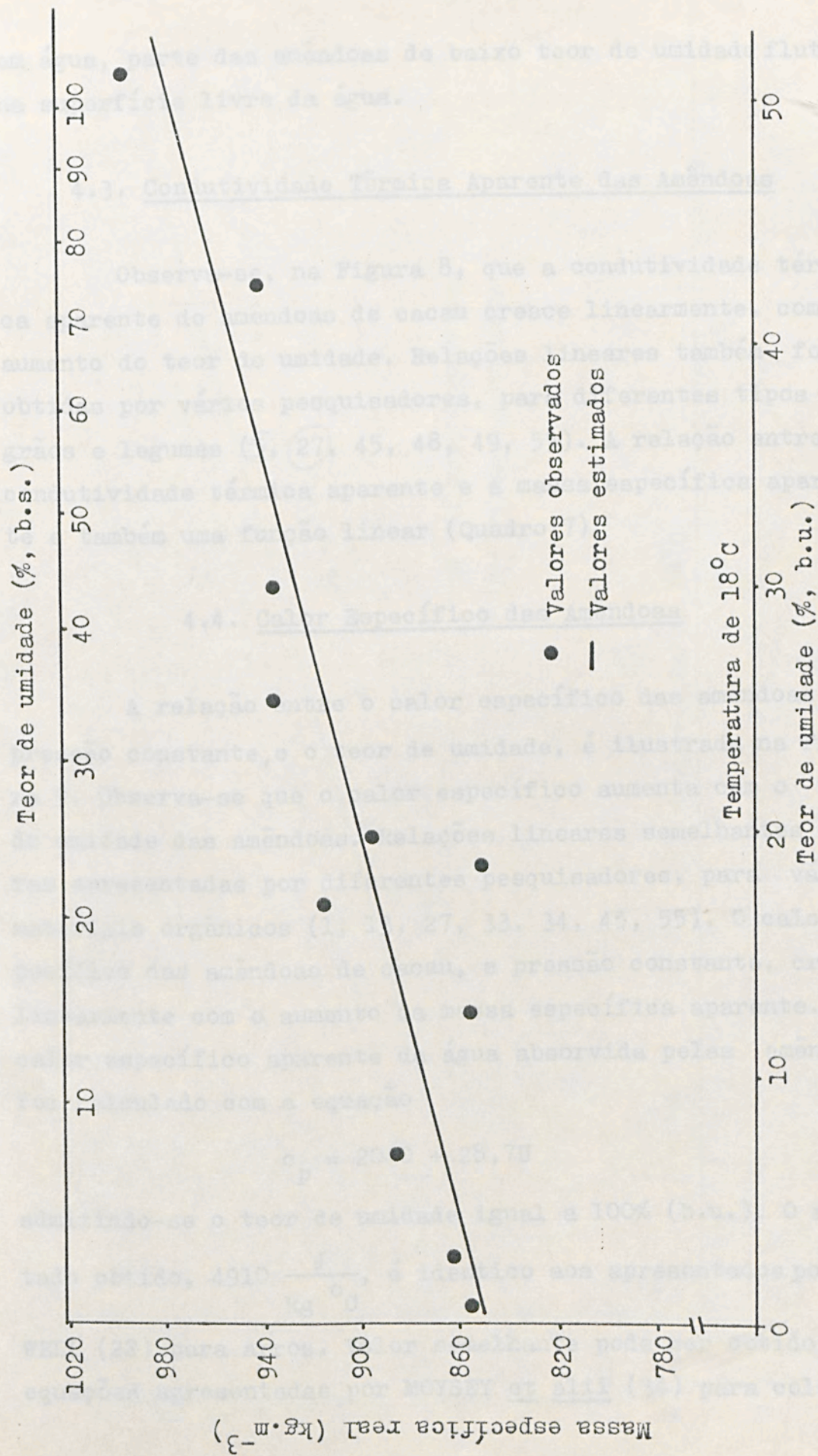


FIGURA 7 - Variação da massa específica real das amêndoas de cacau, com o teor de umidade.

em água, parte das amêndoas de baixo teor de umidade flutuam na superfície livre da água.

4.3. Condutividade Térmica Aparente das Amêndoas

Observa-se, na Figura 8, que a condutividade térmica aparente de amêndoas de cacau cresce linearmente, com o aumento do teor de umidade. Relações lineares também foram obtidas por vários pesquisadores, para diferentes tipos de grãos e legumes (5, 27, 45, 48, 49, 55). A relação entre a condutividade térmica aparente e a massa específica aparente é também uma função linear (Quadro 7).

4.4. Calor Específico das Amêndoas

A relação entre o calor específico das amêndoas, a pressão constante, e o teor de umidade, é ilustrada na Figura 9. Observa-se que o calor específico aumenta com o teor de umidade das amêndoas. Relações lineares semelhantes foram apresentadas por diferentes pesquisadores, para vários materiais orgânicos (1, 13, 27, 33, 34, 45, 55). O calor específico das amêndoas de cacau, a pressão constante, cresce linearmente com o aumento da massa específica aparente. O calor específico aparente da água absorvida pelas amêndoas foi calculado com a equação

$$c_p = 2040 + 28,7U \quad (10)$$

admitindo-se o teor de umidade igual a 100% (b.u.). O resultado obtido, $4910 \frac{\text{J}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}}$, é idêntico aos apresentados por HAS

WELL (22) para arroz. Valor semelhante pode ser obtido das equações apresentadas por MOYSEY et alii (34) para colza e

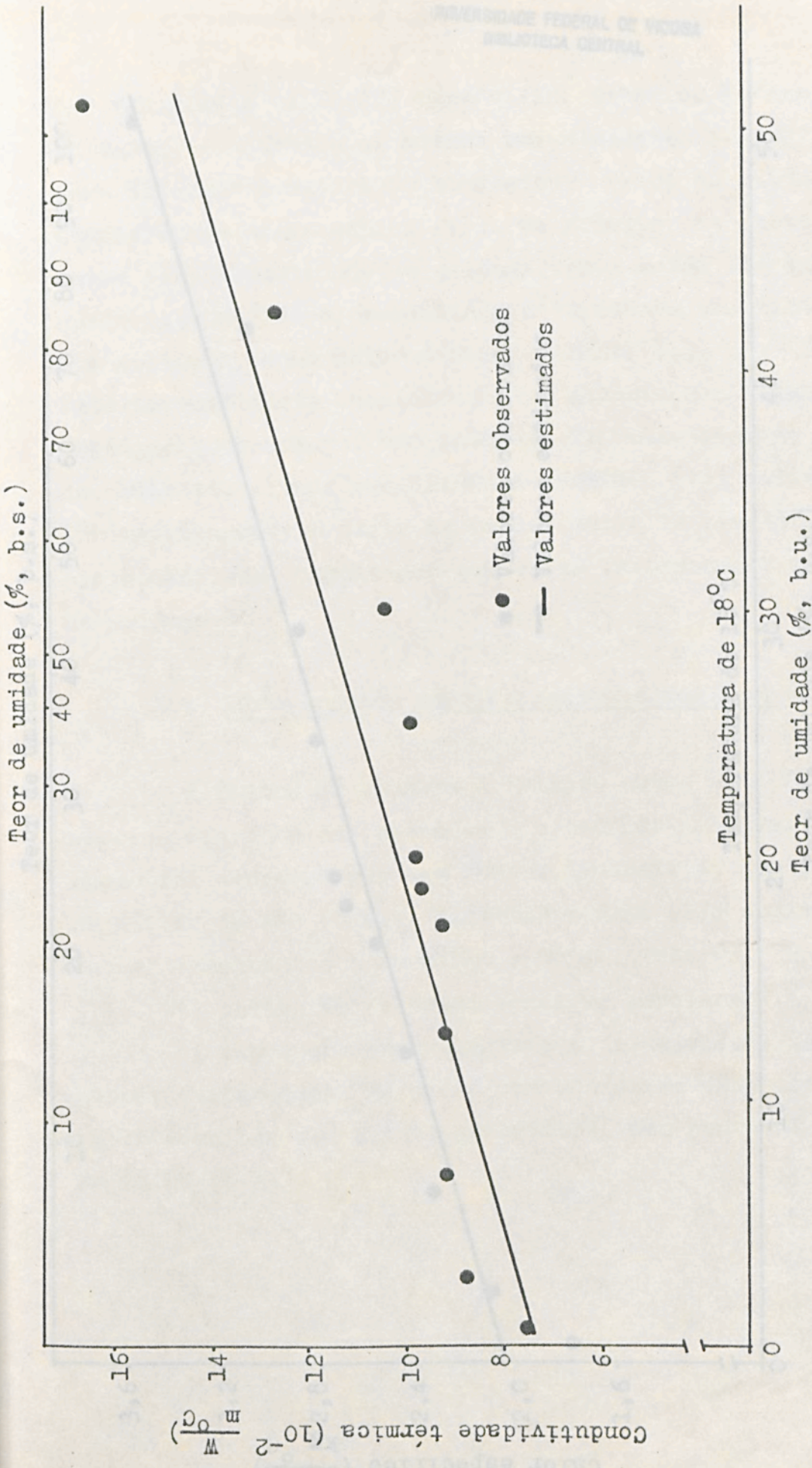


FIGURA 8 - Variação da condutividade térmica aparente das amêndoas de cacau, com o teor de umidade.

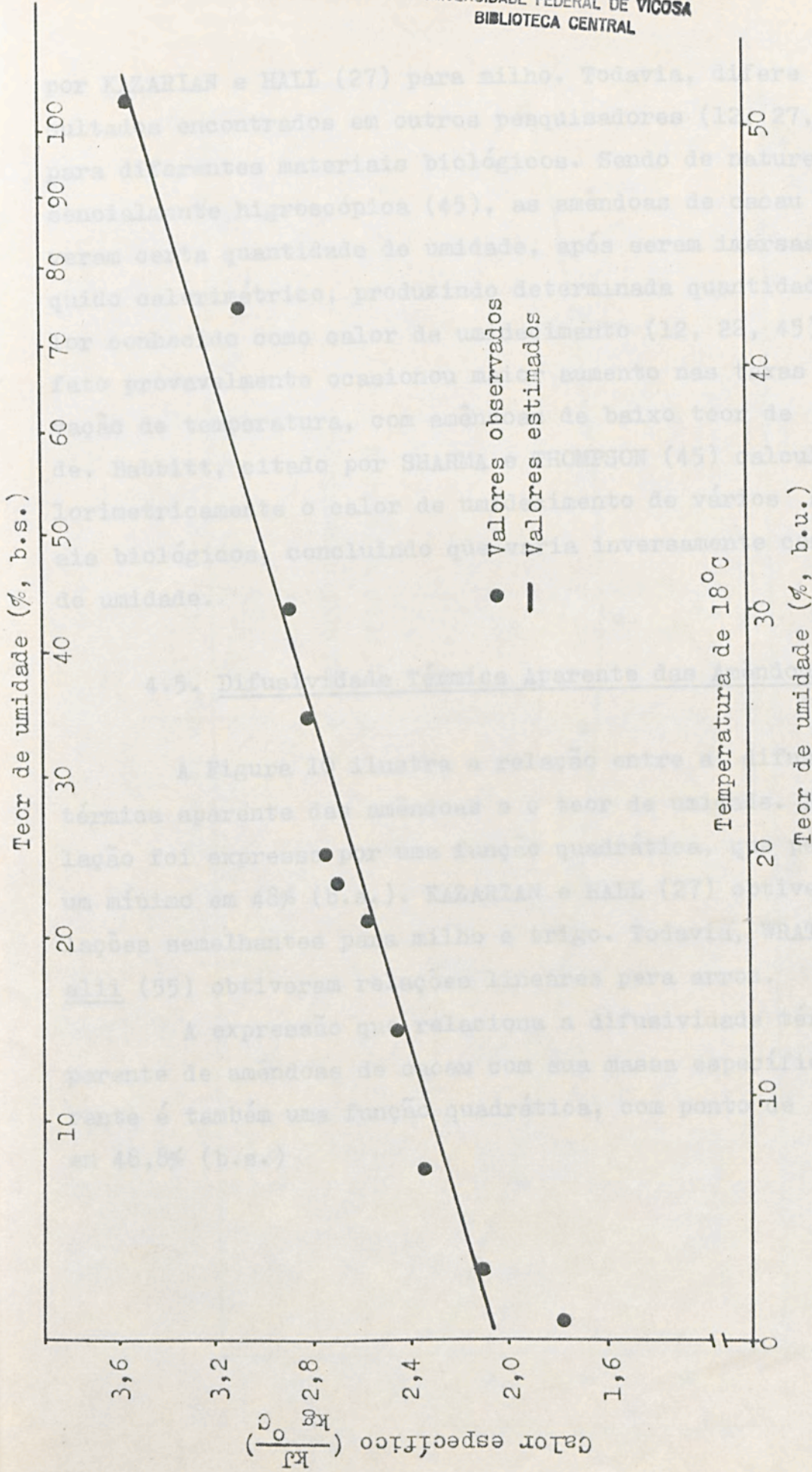


FIGURA 9 - Variação do calor específico das amêndoas de cacau, com o teor de umidade.

por KAZARIAN e HALL (27) para milho. Todavia, difere de resultados encontrados em outros pesquisadores (12, 27, 55) para diferentes materiais biológicos. Sendo de natureza essencialmente higroscópica (45), as amêndoas de cacau absorveram certa quantidade de umidade, após serem imersas no líquido calorimétrico, produzindo determinada quantidade de calor conhecido como calor de umidecimento (12, 22, 45). Este fato provavelmente ocasionou maior aumento nas taxas de elevação de temperatura, com amêndoas de baixo teor de umidade. Babbitt, citado por SHARMA e THOMPSON (45) calculou calorimetricamente o calor de umidecimento de vários materiais biológicos, concluindo que varia inversamente com o teor de umidade.

4.5. Difusividade Térmica Aparente das Amêndoas

A Figura 10 ilustra a relação entre a difusividade térmica aparente das amêndoas e o teor de umidade. Esta relação foi expressa por uma função quadrática, que passa por um mínimo em 48% (b.s.). KAZARIAN e HALL (27) obtiveram relações semelhantes para milho e trigo. Todavia, WRATTEN et alii (55) obtiveram relações lineares para arroz.

A expressão que relaciona a difusividade térmica aparente de amêndoas de cacau com sua massa específica aparente é também uma função quadrática, com ponto de mínimo em 48,8% (b.s.)

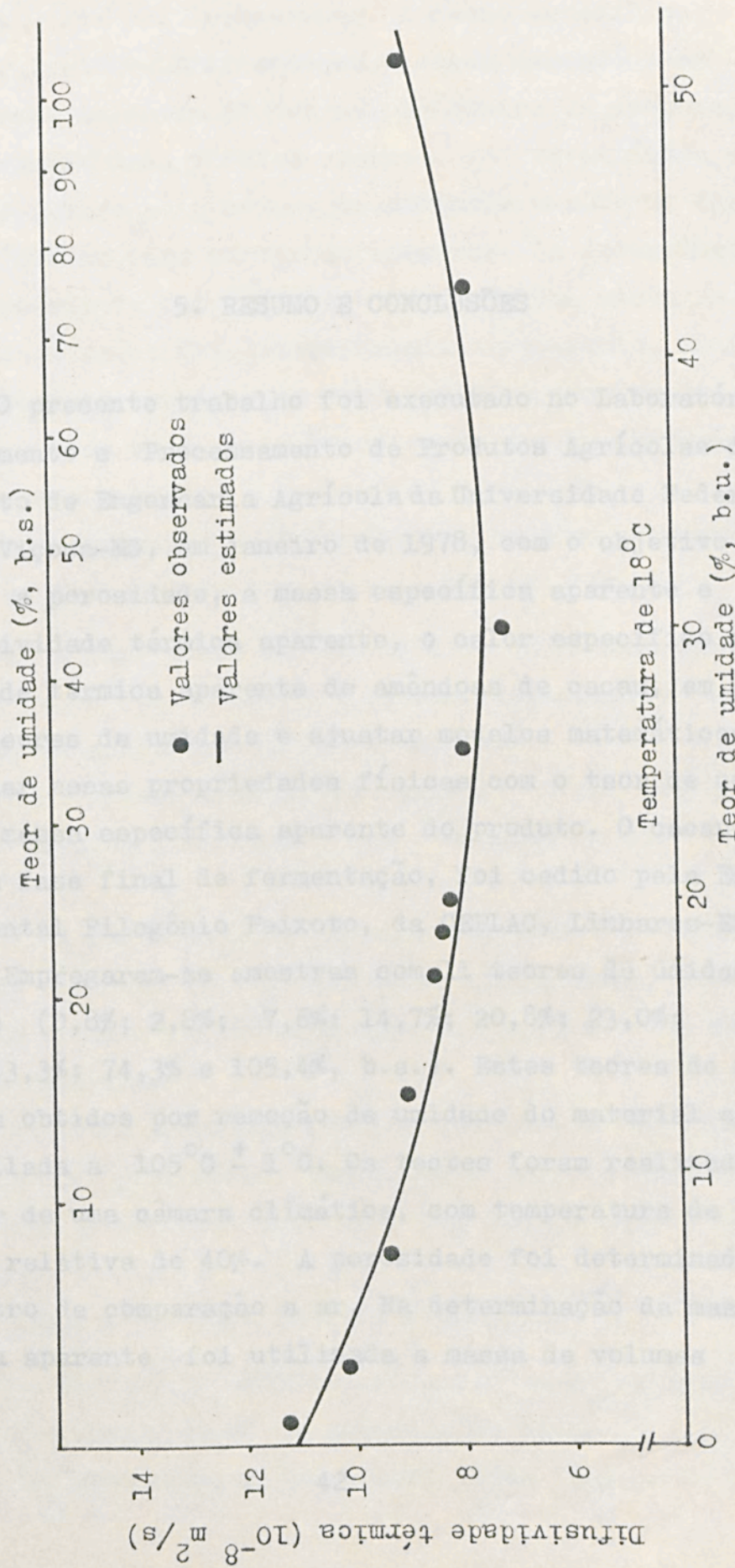


FIGURA 10 - Variação da difusividade térmica aparente das amêndoas de cacau, com o teor de umidade.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

O presente trabalho foi executado no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, em janeiro de 1978, com o objetivo de determinar a porosidade, a massa específica aparente e real, a condutividade térmica aparente, o calor específico e a difusividade térmica aparente de amêndoas de cacau, em diferentes teores de umidade e ajustar modelos matemáticos para relacionar essas propriedades físicas com o teor de umidade e com a massa específica aparente do produto. O cacau utilizado, em fase final de fermentação, foi cedido pela Estação Experimental Filogônio Peixoto, da CEPLAC, Linhares-ES.

Empregaram-se amostras com 11 teores de umidade diferentes (0,8%; 2,8%; 7,6%; 14,7%; 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 $105^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Os testes foram realizados no interior de uma câmara climática, com temperatura de 18°C e umidade relativa de 40%. A porosidade foi determinada num picnômetro de comparação a ar. Na determinação da massa específica aparente foi utilizada a massa de volumes fixos

(750,0 cm³ cada um) de amêndoas. A massa específica real foi determinada relacionando-se a massa das amêndoas e seu volume real, determinado com um picnômetro de comparação a ar. A condutividade térmica aparente foi determinada medindo a temperatura pelo método transitório usando um dispositivo cilíndrico para conter as amostras. Na determinação do calor específico, foi utilizado o método das misturas. A difusividade térmica foi determinada indiretamente, usando-se os valores experimentais da condutividade térmica do calor específico e da massa específica aparente. Os valores observados foram submetidos à análise de regressão,

As conclusões deste trabalho, para as condições utilizadas de temperatura e teores de umidade foram:

1. A porosidade de amêndoas de cacau decresce linearmente, tanto com o aumento do teor de umidade, como com o aumento da massa específica aparente.

2. A massa específica aparente e real de amêndoas de cacau crescem linearmente com o aumento do teor de umidade.

3. A condutividade térmica aparente e o calor específico de amêndoas de cacau crescem linearmente, tanto com o aumento do teor de umidade como com o aumento da massa específica aparente.

4. A difusividade térmica aparente de amêndoas de cacau, é função quadrática, tanto com o teor de umidade como com a massa específica aparente, com mínimo em 48% de umidade (b.s.).

Sugerem-se para futuros trabalhos:

a. Estudo do efeito das condições de secagem sobre as propriedades físicas de amêndoas de cacau.

b. Determinação das propriedades físicas de amêndoas

de cacau, com amêndoas de outras regiões cacaueiras do Brasil.

c. Determinação das propriedades físicas de amêndoas de cacau, em diferentes temperaturas de trabalho.

d. Utilização de equipamento mais aperfeiçoado para determinar a condutividade térmica das amêndoas, em menor intervalo de tempo, usando corrente elétrica de menor intensidade.

e. Utilização de calorímetro de varredura diferencial, para determinar o calor específico das amêndoas.

f. Determinação da difusividade térmica aparente, independente do calor específico e da massa específica.

3. BROSEWITZ, G.H. Density of rewetted high moisture grains. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 10(5): 935-936, 1975.

4. GHANBARABADI, S.N. & JOHNSON, W.E. Specific heat of flue-cured tobacco by differential scanning calorimetry. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 15(5): 928-931, 1972.

5. CHANDRA, S. & MUTN, W.E. Thermal conductivity of spring wheat at low temperature. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 14(4):544-546, 1971.

6. CHEN, A.C. & HELLMAN, D.R. An analysis of the thermal properties of dry food powder in a packed bed. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 15(5):951-955, 1972.

7. CHUNG, D.S. & CONVERSE, H.H. Effect of moisture content on some physical properties of grains. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 14(4):612-614 & 620, 1971.

6. LITERATURA CITADA

1. ALAM, A. Simulated drying of soybeans. Urbana-Champaign, Ill., University of Illinois, 1972. 201 p. (Tese de Ph.D.).
2. BILANSKI, W.K. & FISHER, D.R. Thermal conductivity of rapeseed. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 19(4):788-791, 1976.
3. BRUSEWITZ, G.H. Density of rewetted high moisture grains. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 18(5):935-938, 1975.
4. CHAKRABARTI, S.M. & JOHNSON, W.H. Specific heat of flue cured tobacco by differential scanning calorimetry. Transaction of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 15(5):928-931, 1972.
5. CHANDRA, S. & MUIR, W.E. Thermal conductivity of spring wheat at low temperature. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 14(4):644-646, 1971.
6. CHEN, A.C. & HELDMAN, D.R. An analysis of the thermal properties of dry food powder in a packed bed. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 15(5):951-955, 1972.
7. CHUNG, D.S. & CONVERSE, H.H. Effect of moisture content on some physical properties of grains. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 14(4):612-614 e 620, 1971.

8. CRUMPTON, W.R. & THREADGILL, E.D. Thermal diffusivity of sweet potatoes. Transaction of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 20(3):589-592, 1977.
9. DAY, C. LeRoy. A device for measuring voids in porous materials. Agricultura Engineering, Missouri, Columbia, 45(1):36-37, January, 1964.
10. DICKERSON, Jr., R.W. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. Food Technology, Chicago, 19:880-886, may, 1965.
11. DICKERSON, Jr., R.W. & READ, Jr., R.B. Calculation and measurement of heat transfer in foods. Food Technology, Chicago, 22:1533-1535, 1545 e 1547-1548, december, 1968.
12. DISNEY, R.W. The specific heat of some cereal grains. Cereal Chemistry, Slough, Bucks, England, 31(3):229-239, 1954.
13. DUNCAN, G.A.; BUNN, J.M. & HENSON, Jr., W.H. Specific heat of burley tobacco during the cure. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 11(4):480-483, 1968.
14. ECKERT, E.R.G. & DRAKE, Jr., R.M. Heat and mass transfer. 2nd ed. Tokyo, Kogakusha, 1959. 530 p.
15. FAIRES, V.M. Termodinâmica. 4. ed. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico, 1966. 879 p.
16. FAO. Fao production yearbook 1976. Rome, v. 30, 1977.
17. FLEURY, P. & MATHIEU, J.P. Calor. Termodinâmica. Estados de la materia. Madrid, Paraninfo, 1964. 598 p.
18. FORD, R.M. & BILANSKI, W.K. Thermal diffusivity of alfalfa stems. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 12(2):249-251, 1969.

19. FORTES, M. A non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary-porous media with special reference to drying of grains and foods. Purdue, Purdue University, 1978. 226 p. (Tese de Ph.D.).
20. GUSTAFSON, J.R. & HALL, G.E. Density and porosity changes of shelled corn during drying. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 15(3):523-525, 1972.
21. HALL, C.W. Drying farm crops, 5th ed. Ann Arbor, Michigan, Edwards Brothers, 1966. 336 p.
22. HASWELL, G.A. A note on the specific heat of rice, oats, and their products. Cereal Chemistry, Slough, Bucks, England, 31(4):341-342, 1954.
23. HAUGH, C.G.; STADELMAN, W.J. & SWEAT, V.E. Thermal conductivity of meat and skin of poultry at temperature between -35°C and 20°C. Agricultural Engineering Department. Purdue University, Lafayette, Indiana, /s. d./ . 13 p.
24. HOLMAN, J.P. Heat transfer. 2nd ed. New York, McGraw-Hill, 1968. 401 p.
25. HUGGINS, L.F. Analysis and interpretation. In: Instrumentation and measurement for environmental sciences. St. Joseph, Michigan. ASAE, 1975. Cap. 15.
26. JASANSKY, A. & BILANSKI, W.K. Thermal conductivity of whole and ground soybeans. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 16(1):100-103, 1973.
27. KAZARIAN, E.A. & HALL, C.W. Thermal properties of grain. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 8(1):33-38, 1965.
28. KREITH, F. Princípios da transmissão de calor. São Paulo, Edgard Blucher, 1973. 650 p.

29. MARAVALHAS, N. Novo tipo de conjunto secador para cacau fermentado. Cacau atualidades, Ilhéus, 13(3):6-9, 1976.
30. MATHEWS, 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, St. Joseph, Michigan, 11(4):558-562 e 565, 1968.
31. MIKHEYEV, M. Fundamentals of heat transfer. Moscow, Peace Publishers, [s.d.]. 376 p.
32. MOHSEENIN, N.N. Physical properties of plant and animal materials. New York, Gordon and Breach, 1972. 734 p.
33. _____. 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.
34. 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, St. Joseph, Michigan, 20(4):768-771, 1977.
35. MUIR, W.E. & VIRAVANICHAI, S. Specific heat of wheat. Journal of Agricultural Engineering Research. Wrest Park, Silsol, Gedford, 17:338-342, 1972.
36. NIX, G.H.; LOWERLY, G.W.; VACHON, R.I. & TANGER, G.E. Direct determination of thermal diffusivity and conductivity with a refined line-source technique. In: Progress in Aeronautics and Astronautics. Thermophysics of spacecraft and planetary bodies. New York, Academic Press, 1967. v. 20, p. 865-878.
37. NIX, G.H.; VACHON, R.I.; LOWERY, G.W. & McCURRY, T.A. The line-source method: procedure and iteration scheme for combined determination of conductivity and diffusivity. In: Thermal conductivity. Proceedings of the 8th conference. New York, Plenum Press, 1969, v. 4, p. 999-1008.

38. OBERT, E.F. & YOUNG, R.L. Elements of thermodynamics and heat transfer. 2nd ed. New York, McGraw-Hill, 1962. 358 p.
39. ONU. Department of Economic and Social Affairs. Yearbook of international trade statistics 1976. New York, v. 2, 1977.
40. OTT, L.E. & HURLBUT, L.W. Thermal diffusivity of compressed alfalfa hay. St. Joseph, Michigan, ASAE, 1964. 8 p. (Paper n. 64-817, apresentado no Encontro Anual da American Society of Agricultural Engineers - 1967).
41. PRADO, E.P. do. Secagem de sementes de cacau em camadas finas, a sessenta e oitenta graus célsius e variação da porosidade durante o processamento. Viçosa, U.F.V., Imprensa Universitária, 1978. 31 p. (Tese de M.S.).
42. RAO, M.A.; BARNARD, J. & KENNY, J.F. Thermal conductivity of process variety squash and wheat potatoes. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 18(6):1188-1192, 1975.
43. REIDY, G.A. & RIPPEN, A.L. Methods for determining thermal conductivity in foods. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 14(2):248-254, 1971.
44. ROHSENOW, W.M. & CHOI, H.Y. Heat, mass and momentum transfer. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1961. 537 p.
45. SHARMA, D.K. & THOMPSON, T.L. The specific heat and thermal conductivity of grain sorghum. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 16(1):114-117, 1973.
46. SINHA, R.N. & MUIR, W.E. Grain storage: part of a system. Westport, Connecticut, AVI, 1973. 481 p.
47. SKAGGS, R.W. & SMITH, E.M. Apparent thermal conductivity of soil as related to soil porosity. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 11(4):504-507, 1968.

48. SUTER, D.A.; AGRAWAL, K.K. & CLARY, B.L. Thermal properties of peanut pods, hulls and kernels. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 18(2):370-375, 1975.
49. SWEAT, V.E. Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. Journal of Food Science, Chicago, 39:1080-1083, 1974.
50. SWEAT, V.E.; HAUGH, C.G. & STADELMAN, W.J. Thermal conductivity of chicken meat at temperatures between -75°C and 20°C . Journal of Food Science, Chicago, 38:158-160, 1973.
51. THOMPSON, R.A. & ISAACS, G.W. Porosity determination of grains and seeds with an air comparison pycnometer. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 10(5):693-696, 1967.
52. WATTS, K.C. Thermal properties of soybeans. Guelph, Ontario, Guelph University, 1967. 96 p. (Tese de M.S.).
53. WATTS, K.C. & BILANSKI, W.K. Method for estimating the thermal diffusivity of whole soybeans. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 16(6):1143-1145, 1973.
54. WOODAMS, E.E. & NOWREY, J.E. Literature values of thermal conductivities of foods. Food Tecnology, Chicago, 22:494-502, Apr. 1968.
55. 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, 12(6):801-803, 1969.
56. WRIGHT, M.E. & PORTERFIELD, J.G. Specific heat of spanish peanut. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 13(4):508-510, 1970.

57. YOUNG, J.H. & WHITAKER, T.B. Specific heat of peanuts by differential scanning calorimetry. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, 16(3):522-524, 1973.

7. APÊNDICE

7.1. Revisão Teórica

7.1.1. Condutividade Térmica

Se o gradiente de temperatura, dt/dx , entre as duas superfícies através das quais o calor estiver fluindo for unitário, a quantidade de calor que flui na unidade de tempo, Q , através de uma área unitária, A , é chamada condutividade térmica do material, e simbolizada por K . Matematicamente, a condutividade térmica é o fator de proporcionalidade da lei de Fourier, para condução de calor, dada por

$$\frac{dQ}{dt} = -K A \frac{dt}{dx} \quad (11)$$

A condutividade térmica de materiais sólidos varia com o material, temperatura e teor de umidade. A variação da condutividade térmica de produtos biológicos é maior que em outros materiais, pois apresentam composição heterogênea, estrutura celular e porosidade variadas.

Lei de Fourier do Aquecimento e Resfriamento

No caso geral de aquecimento ou resfriamento de um

7. APÊNDICE

7.1. Revisão Teórica

7.1.1. Condutividade Térmica

Se o gradiente de temperatura, dT/dx , entre as duas superfícies através das quais o calor estiver fluindo for unitário, a quantidade de calor que flui na unidade de tempo, Q , através de uma área unitária, A , é chamada condutividade térmica do material, e simbolizada por K . Matematicamente, a condutividade térmica é o fator de proporcionalidade da lei de Fourier, para condução de calor, dada por

$$\frac{dQ}{dt} = - K dA \frac{dT}{dx} \quad (11)$$

A condutividade térmica de materiais sólidos varia com o material, temperatura e teor de umidade. A variação da condutividade térmica de produtos biológicos é maior que em outros materiais, pois apresentam composição heterogênea, estrutura celular e porosidade variadas.

Lei de Fourier do Aquecimento e Resfriamento

No caso geral de aquecimento ou resfriamento de ali

mentos e produtos agrícolas, a condutância superficial, h , é grande, quando comparada com a condutividade térmica, K . Logo, a temperatura na superfície do material varia mais rapidamente que no interior, estabelecendo-se por isso um apreciável gradiente de temperatura.

A equação diferencial de Fourier da história de temperatura num sólido é derivada da conservação de energia para um elemento espacial infinitesimal (14, 15, 17, 24, 28, 31, 38, 44). A taxa líquida de condução de calor no elemento mais a de geração interna de calor é igual ao aumento da energia interna. Para um material isotrópico com fonte interna de calor, no qual a condutividade térmica não é constante, a condução de calor é dada pela equação de Fourier, em coordenadas triortogonais, na forma:

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(K \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(K \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(K \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + \dot{q} = \rho_a c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

onde:

\dot{q} - indica a taxa temporal de calor gerado internamente num elemento de volume. Se a condutividade térmica, K for uniforme e constante, teremos:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{\dot{q}}{K} = \frac{\rho_a c}{K} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (13)$$

Para um material sem fonte interna de calor, reduz-se a equação 13 a:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right] \quad (14)$$

em que $\alpha = \frac{K}{\rho_a c}$ é a difusividade térmica. Nestas equações

a derivada parcial é usada, porque a temperatura, T , pode depender das coordenadas x , y , z .

A obtenção de soluções para sólidos cilíndricos e esféricos é feita, convertendo-se a equação 13 em coordenadas polares ou esféricas, ou derivando-a em termos destas coordenadas. Supõe-se em cada uma destas formas que as propriedades térmicas (condutância superficial, condutividade térmica e calor específico) e o valor x ou r são constantes com a temperatura e no tempo. Supõe-se, ainda, que o corpo seja inicialmente isotérmico, e exposto repentinamente a mudança da temperatura ambiente.

A equação de Fourier, em coordenadas cilíndricas, a partir da equação 13 é dada por:

$$\left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{\dot{q}}{K} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (15)$$

onde:

r = distância radial

θ = ângulo polar

z = distância axial

Para um material sem fonte interna de calor, \dot{q} , e condutividade térmica constante, K , a equação de Fourier para um cilindro infinito é dada na forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (16)$$

Havendo apenas gradiente radial de temperatura, a equação 16 reduz-se a:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad (17)$$

Em coordenadas esféricas, a equação 13 exprime-se por:

$$\frac{1}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} \right] + \frac{\dot{q}}{K} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (18)$$

onde:

θ = longitude

ϕ = latitude

Para um material sem fonte interna de calor e condutividade térmica constante, a equação de Fourier, para sólidos esféricos, reduz-se a:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} \right] \quad (19)$$

Se a temperatura T não variar com θ e ϕ a equação 19 assume a forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad (20)$$

No presente estudo, foi aplicada a teoria da fonte linear de calor (4, 5, 26, 27, 36, 37, 42, 45, 48, 55) para determinar a condutividade térmica aparente de cacau em amêndoas pelo método transitório, usando a solução da equação 17. Embora sugerido desde 1888 por Shcleiermacher, citado por NIX *et alii* (36), este método somente foi empregado,

pela primeira vez, em 1948, por van der Held e van Drumen, citados por NIX et alii (36). As principais vantagens que apresenta são a redução para apenas poucos minutos do intervalo de tempo empregado na realização de cada teste, e a conseqüente minimização da migração de umidade, no interior do material.

A solução da equação 17 foi apresentada por van der Held e van Drumen, Hooper e Lepper e Ingersol et alii, citados por SUTER et alii (48), para o caso particular da temperatura na fonte, como função da intensidade da fonte, tempo, posição espacial e propriedades térmicas, na forma:

$$T = \frac{Q'}{2K \cdot \pi} \int_{\beta}^{\infty} \frac{\exp(-x^2)}{x} dx \quad (21)$$

onde:

T = é a temperatura até o instante t ($^{\circ}\text{C}$)

Q' = é a potência dissipada pela fonte, por unidade de comprimento ($\frac{\text{W}}{\text{m}}$)

K = é a condutividade térmica ($\frac{\text{W}}{\text{m } ^{\circ}\text{C}}$)

$\beta = \frac{r}{2\sqrt{\pi t}}$ é um parâmetro integral (adimensional)

r = é a distância radial da fonte (m)

α = é a difusividade térmica (m^2/s)

t = é o tempo medido, a partir do início do fluxo de calor (s)

$$\int_{\beta}^{\infty} \frac{\exp(-x^2)}{x} dx = I(\beta) \text{ é a função de Bessel}$$

A solução da função de Bessel apresentada por Hoo-

per e Lepper, citados por NIX et alii (36), na forma de série foi dada por:

$$I(\beta) = -\frac{C_e}{2} - \ln \beta + \frac{\beta^2}{2.1!} - \frac{\beta^4}{4.2!} + \dots \quad (22)$$

onde:

C_e = é a constante de Euler

Para pequenos valores de r , tais que $\beta < 0,16$, a equação 22 pode ser reduzida a:

$$T = \frac{Q'}{2K\pi} \left(-\frac{C_e}{2} - \ln \beta \right) \quad (23)$$

com erro menor que 1%, segundo NIX et alii (36).

Ao empregar a equação 23, para determinar a variação de temperatura, num ponto contíguo à fonte, no intervalo de tempo compreendido entre t_1 e t_2 , obtém-se:

$$T_2 - T_1 = \frac{Q'}{4K\pi} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (24)$$

onde:

T_1 = temperatura no instante t_1

T_2 = temperatura no instante t_2

Por meio da equação 24, a condutividade térmica, K , pode ser calculada, a partir dos valores medidos para Q , t_1 , t_2 , T_1 e T_2 .

$$K = \frac{Q'}{4\pi (T_2 - T_1)} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (25)$$

A equação 25 foi obtida admitindo-se uma fonte de ca

lor linear, ideal, de comprimento infinito, num meio homogêneo. Na prática, a amostra é finita, a fonte tem comprimento finito e sua intensidade não é perfeitamente constante. Por outro lado, o raio e a massa da fonte não são nulos e suas propriedades térmicas diferem das do material de teste.

Van der Held e van Drummen, citados por NIX et alii (36) analisaram os erros causados pelos desvios, em instrumento semelhante e concluíram que dois fatores constituem a principal fonte de erro: a) o comprimento finito da fonte de calor; b) as propriedades térmicas da fonte. Sugeriram, por conseguinte, a determinação por processo gráfico de um termo de correção de tempo para compensar esses dois fatores. O método foi aplicado por Hooper e Lepper, citados por JASANKY e BILANSKI (26). Consiste em construir um gráfico de $\frac{dt}{dT}$ versus t ($\frac{dt}{dT} \times t$), e determinar o valor de t_0 correspondente a $\frac{dt}{dT} = 0$. t_0 - o termo de correção - é o intervalo de tempo, durante o qual a própria fonte utilizou energia, para aumento de sua vibração molecular. Introduzindo-se o valor de t_0 na equação 25, tem-se:

$$K = \frac{Q'}{4 \pi (T_2 - T_1)} \ln \left(\frac{t_2 - t_0}{t_1 - t_0} \right) \quad (26)$$

7.1.2. Calor Específico

A razão entre o calor, Q , fornecido a um corpo e a correspondente variação de temperatura, ΔT , é definida como capacidade térmica do corpo. O calor específico é definido como a razão entre a capacidade térmica e a massa do cor

po:

$$c = \frac{Q}{m \Delta T} \quad (27)$$

onde:

c = é o calor específico

$\frac{Q}{\Delta T}$ = capacidade térmica

m = massa do corpo

Dependendo da maneira como a energia é armazenada no material, esta propriedade térmica pode ser dada, ora como calor específico, a volume constante, ora a pressão constan-te. Uma vez que os processos de transmissão de calor, em materiais biológicos, geralmente se realizam a pressão constan-te, o calor específico desses materiais é determinado usualmente a pressão constante. À exceção de pressões extremamente altas, o calor específico de sólidos e líquidos é pouco influenciado por variações de pressão.

A energia térmica propaga-se através de uma substância, em virtude de um gradiente de temperatura, $\frac{dT}{dx}$. O calor específico de uma substância denota a variação de sua temperatura, com a quantidade de calor nela armazenado. Se for considerada uma quantidade infinitesimal de calor, dQ , necessária para produzir uma variação infinitesimal de temperatura, dT , num corpo de massa m , ter-se-á:

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{dQ}{dT} \quad (28)$$

A equação 28 indica que o calor específico, c , é função da temperatura. Entretanto, considera-se o calor específico

fico uma constante a temperaturas ordinárias de trabalho e em intervalos de temperatura não muito grandes. Somente a temperaturas extremamente baixas, perto do zero absoluto, todos os valores de calor específico diminuem, e para algumas substâncias aproximam-se de zero.

7.2. Resultados

7.2.1. Calibração do Picnômetro

Os dados experimentais obtidos na calibração do picnômetro são mostrados no Quadro A1. Foi ajustada, por análise de regressão, a equação:

$$P = 0,82 + 1,068 P_0 \quad (29)$$

$$R^2 = 0,999$$

$$S_p = 0,8$$

onde:

P = porosidade (%)

P_0 = porosidade experimental (%)

R^2 = coeficiente de determinação

S_p = desvio padrão de regressão (%)

Esta equação foi usada para corrigir os valores de porosidade das amêndoas.

QUADRO A1 -- Dados experimentais de porosidade para calibração do picnômetro*

Volume de água (cm ³)	Porosidade		CV (%)	SN (%)	Limites de confiança para a média (%)	
	Esperada	Observada			Li	Ls
	P _e (%)	P (%)			s (%)	
0	100,0	94,1	2,0	0,6	92,7	95,5
50,0	93,33	86,9	2,0	0,6	85,5	88,3
100,0	86,67	79,8	1,8	0,6	78,5	81,1
150,0	80,00	75,4	1,5	0,5	74,3	76,4
200,0	73,33	68,3	2,0	0,6	66,9	69,7
250,0	66,67	60,1	1,5	0,5	59,0	61,2
300,0	60,00	55,0	0,9	0,29	54,3	55,6
350,0	53,33	48,95	1,2	0,37	48,11	49,79
400,0	46,67	42,00	0,7	0,23	41,48	42,52
450,0	40,00	35,94	1,0	0,33	35,19	36,69
500,0	33,33	30,54	0,7	0,23	30,02	31,06
550,0	26,67	24,20	0,6	0,20	23,75	24,65
600,0	20,00	17,80	0,6	0,17	17,42	18,18
650,0	13,33	12,13	0,40	0,13	11,84	12,41
700,0	6,67	5,83	0,40	0,13	5,55	6,11
750,0	0	0,263	0,07	0,026	0,204	0,322

* P = porosidade esperada; P = média, com 10 repetições; s = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; SN = desvio padrão da média; Li e Ls = respectivamente, limites inferior e superior do intervalo de confiança.

QUADRO A2 - Equação de regressão ajustada para a calibração do picnômetro*

Regressão $Y = b + aX$	Coefficiente de determinação R^2	Desvio padrão de regressão S
$P = 0,82 + 1,068P_0$	0,999	0,8

* P = porosidade estimada.
 P_0 = porosidade observada.

QUADRO A3 - Capacidade térmica. para calibração

C ($J/^{\circ}C$)	s ($J/^{\circ}C$)	CV (%)	S_N ($J/^{\circ}C$)	Limites de confiança para a média ($J/^{\circ}C$)	
				Li	Is
31,47	2,29	7,27	0,42	30,62	32,45

QUADRO A4 - Determinação experimental do calor específico de água destilada para calibração do calorímetro.

c ($\frac{kJ}{kg \ ^{\circ}C}$)	s ($\frac{J}{kg \ ^{\circ}C}$)	CV (%)	S_N ($\frac{J}{kg \ ^{\circ}C}$)	Limites de confiança para a média ($\frac{J}{kg \ ^{\circ}C}$)	
				Li	Is
4,070	285	7,00	54	3956	4182

* C e c = média, com 29 repetições; s = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; S_N = desvio padrão da média; Li e Is = respectivamente, limites inferior e superior do intervalo de confiança.

QUADRO A5 - Porosidade da massa granular de cacau*

Teor de umidade (%, b.s.o.)	P (%)	s (%)	CV (%)	SN (%)	Limites de confiança para a média (%)	
					Li	Is
0,8	56,67	1,0	1,8	0,15	56,35	56,95
2,8	53,40	1,4	2,7	0,21	52,96	53,80
7,6	54,42	1,3	2,4	0,19	54,02	54,78
14,7	51,82	1,2	2,2	0,17	51,46	52,14
20,8	53,31	1,2	2,2	0,17	52,95	53,63
23,0	50,69	1,1	2,2	0,16	50,34	50,98
25,0	49,08	1,2	2,5	0,18	48,69	49,41
34,4	52,01	0,80	1,5	0,12	51,57	52,41
43,3	45,45	0,66	1,5	0,10	45,21	45,61
74,3	44,03	1,2	2,6	0,17	43,65	44,33
105,4	47,14	0,81	1,7	0,12	46,69	47,53

* P = média, com 50 repetições; s = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; SN = desvio padrão da média; Li e Is = respectivamente, limites inferior e superior do intervalo de confiança; b.s.o. = base seca.

QUADRO A6 - Massa específica aparente das amêndoas de cacau*

Teor de umidade (%, b.s.)	ρ_a (kg/m ³)	s (kg/m ³)	CV (%)	SN (kg/m ³)	Limites de confiança para a média (kg/m ³)	
					Li	Ls
0,8	373,0	2,7	0,72	0,8	371,2	374,8
2,8	405	15	3,6	5	395	416
7,6	414,0	6	1	1,8	409,9	418,1
14,7	416,2	3,1	0,75	1,0	413,9	418,5
20,8	424	13	3,2	5	413	434
23,0	434,5	6	1	1,9	430,2	438,8
25,0	439,3	2,5	0,58	0,8	437,5	441,1
34,4	448,9	3,3	0,73	1,0	446,6	451,2
43,3	511,8	3,6	0,70	1,1	509,3	514,3
74,3	526	15	2,8	5	516	537
105,4	529,3	7	1	2,5	523,7	535,0

* ρ_a = média, com 10 repetições; s = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; SN = desvio padrão da média; Li e Ls = respectivamente, limites inferior e superior do intervalo de confiança; b.s. = base seca.

QUADRO A7 - Massa específica real das amêndoas de cacau*

Teor de umidade (%, b.s.)	ρ_r (kg/m ³)	s (kg/m ³)	CV (%)	S _N (kg/m ³)	Limites de confiança para a média (kg/m ³)	
					Li	Ls
0,8	855,1	21	2,4	3,0	848,3	861,9
2,8	863,1	27	3,1	3,9	854,3	871,9
7,6	886,1	25	2,8	3,6	878,0	894,2
14,7	855,8	14	1,7	2,1	851,1	860,5
20,8	916,8	26	2,9	3,9	908,0	925,6
23,0	851,1	23	2,7	3,4	843,4	858,8
25,0	897,1	18	2,0	2,6	891,2	903,0
34,4	936,8	16	1,7	2,3	931,6	942,0
43,3	937,4	12	1,2	1,7	933,6	941,2
74,3	942,5	19	2,0	2,8	936,2	948,8
105,4	999,5	15	1,5	2,2	994,5	1004,5

* ρ_r = média, com 50 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.

QUADRO A8 - Condutividade térmica aparente das amêndoas de cacau*

Teor de umidade (%, b.s.)	K_a $(10^{-2} \frac{W}{m \cdot ^\circ C})$	s $(10^{-3} \frac{W}{m \cdot ^\circ C})$	CV (%)	S _N $(10^{-3} \frac{W}{m \cdot ^\circ C})$	Limites de confiança para a média $(10^{-2} \frac{W}{m \cdot ^\circ C})$	
					Li	Ls
0,8	7,52	3,5	4,6	1,1	7,28	7,76
2,8	8,80	4,0	4,5	1,2	8,42	9,18
7,6	9,17	2,6	2,8	0,8	8,99	9,35
14,7	9,18	4,2	4,5	1,3	8,89	9,47
20,8	9,28	2,8	3,0	0,8	9,08	9,47
23,0	9,70	5	5	1,5	9,36	10,04
25,0	9,81	5	5	1,7	9,43	10,19
34,4	9,91	5	5	1,6	9,55	10,27
43,3	10,44	5	5	1,7	10,06	10,82
74,3	12,59	5	4	1,6	12,23	12,95
105,4	16,59	4,2	2,6	1,3	16,30	16,88

* K_a = 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.

QUADRO A9 - Calor específico das amêndoas de cacau*

Teor de umidade (%, b.s.)	c ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}}$)	s ($\frac{\text{J}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}}$)	CV (%)	S _N ($\frac{\text{J}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}}$)	Limites de confiança para a média ($\frac{\text{J}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}}$)	
					Ii	Is
0,8	1,779	71	4,0	21	1733	1825
2,8	2,123	123	6,31	38	2039	2206
7,6	2,370	88	3,7	25	2315	2424
14,7	2,449	163	6,66	46	2345	2558
20,8	2,567	84	3,3	25	2633	2742
23,0	2,688	80	3,0	25	2684	2793
25,0	2,738	100	3,65	29	2742	2868
34,4	2,805	71	2,5	21	2830	2922
43,3	2,876	147	5,11	42	2998	3182
74,3	3,090	142	4,60	42	3446	3630
105,4	3,538	75	2,1	21	3689	3781

* c = média, com 12 repetições; s = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; S_N = desvio padrão da média; Ii e Is = respectivamente, limites inferior e superior do intervalo de confiança; b.s. = base seca.

QUADRO A10 - 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 (%)	SN ($10^{-9} \frac{m^2}{s}$)	Limites de confiança para a média ($10^{-8} \frac{m^2}{s}$)	
					Li	Is
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; SN = desvio padrão da média; Li e Is = respectivamente, limites inferior e superior do intervalo de confiança; b.s. = base seca.

QUADRO All - Resumo das propriedades físicas de amêndoas de cacau

Teor de umi- dade (%, b.s.)	Condutivida- de térmica ($10^{-2} \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$)	Difusivida- de térmica ($10^{-8} \frac{m^2}{s}$)	Calor es- pecífico ($\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$)	Massa espe- fica aparen- te (kg/m^3)	Massa espe- cífica real (kg/m^3)	Porosida- de (%)
0,8	7,52	11,3	1,779	373,0	855,1	56,67
2,8	8,80	10,24	2,123	405	863,1	53,40
7,6	9,17	9,35	2,370	414,0	886,1	54,42
14,7	9,18	9,01	2,449	416,2	855,8	51,82
20,8	9,28	8,53	2,567	424	916,8	53,31
23,0	9,70	8,31	2,688	434,5	851,1	50,69
25,0	9,81	8,16	2,738	439,3	897,1	49,08
34,4	9,91	7,87	2,805	448,9	936,8	52,01
43,3	10,44	7,093	2,876	511,8	937,4	45,45
74,3	12,59	7,746	3,090	526	942,5	44,03
105,4	16,59	8,859	3,538	529,3	999,5	47,14

