



**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES  
TERMOFÍSICAS DE CAFÉ CEREJA  
DESCASCADO**

**RUBEN CÉSAR DE MARIA SOUZA RIBEIRO**

**2001**

**RUBEN CÉSAR DE MARIA SOUZA RIBEIRO**

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE  
CAFÉ CEREJA DESCASCADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, área de concentração em Engenharia de Alimentos, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Flávio Meira Borém

DEG – UFLA



LAVRAS

MINAS GERAIS - BRASIL - BRASIL

2001

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Ribeiro, Ruben César de Maria Souza.

Determinação das propriedades termofísicas de café cereja descascado /  
Ruben César de Maria Souza Ribeiro. -- Lavras : UFLA, 2001.  
79 p. : il.

Orientador: Flávio Meira Borém.

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Café. 2. Café cereja. 3. Café descascado. 4. Propriedade termofísica. I.  
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-633.73

- 663.93

**RUBEN CÉSAR DE MARIA SOUZA RIBEIRO**

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE  
CAFÉ CEREJA DESCASCADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Pós-graduação em Ciência dos Alimentos, área de concentração em Engenharia de Alimentos, para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 30 de abril de 2001

Prof. Dr. Evódio Ribeiro Vilela

UFLA

Prof.<sup>a</sup> Dra. Rosemary G.F. Alvarenga Pereira

UFLA



Prof. Dr. Flávio Meira Borém

DEG-UFLA

(Orientador)

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL

Todas as coisas do universo manifestam-se em nós através do pensamento. Assim, quando sonhamos com alguma coisa e desenhamos mentalmente o seu “esboço” este “projeto”, passa a constituir uma força propulsora que nos leva a agir de modo a concretiza-la em nossas vidas.

Livro dos Jovens

*Aos meus Pais: Mário Siqueira Ribeiro e  
Maria Aparecida de Souza Ribeiro (in memoriam)*

**DEDICO**

*Aos meus filhos Ruben e Luana*  
**OFEREÇO**

## AGRADECIMENTOS

À DEUS.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) especialmente ao Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA), pela oportunidade concedida para realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo durante o curso de mestrado.

Ao CENTREINAR (Centro Nacional de treinamento em Armazenagem), nas pessoas do professor Dr. Paulo César Corrêa (conselheiro), professor Dr. Tetuo Hara, e o Doutorando Paulo César Afonso Júnior pela utilização dos laboratórios e equipamentos, pelo profissionalismo, pelas sugestões, pelo entusiasmo, pela confiança, pela colaboração na orientação na parte experimental e pela amizade.

Ao professor Dr. Flávio Meira Borém, por vezes sensibilizado, pela amizade, orientação e pelos ensinamentos durante a realização deste trabalho, que desfrutei, durante a minha convivência, havendo muito aprendido do esforço e colaboração encontrados nos vários setores de trabalho, numa aprendizagem efetiva pela colaboração de boa vontade, de quem despeço-me hipotecando o meu reconhecimento e amizade, levando para a vida prática tudo de bom que aprendi, como prova marcante de sua competência que aqui trabalha pelo bem da coletividade.

À GEHAKA, pelos recursos financeiro concedidos para realização do trabalho na fase experimental.

Ao professor Evódio Ribeiro Vilela e à professora Rosemary G.F. Alvarenga Pereira, pelo apoio e pelas sugestões apresentadas.

Ao Setor de Cafeicultura do Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras na pessoa do Sr. César Augusto de Moura, pelo fornecimento da matéria prima, ajuda na organização na fase de colheita, pela amizade e atenção dispensadas.

Às laboratoristas, Constantina Maria Braga Torres e Sandra Maria Lacerda Silva pelo carinho e amizade, ensinamentos e orientações de como conduzir-se em um ambiente de laboratório.

Ao amigo e professor Daniel Ferreira Furtado pela amizade e ajuda nas análises estatísticas.

Ao amigo e professor Giovani Francisco Rabelo, pela amizade, e apoio durante esta jornada.

Às professoras Maria de Fátima P. Barcelos e Joelma Pereira pelas dicas e amizade.

Ao professor José Cal-Vidal pela amizade e incentivo.

À secretária Gicelda Aparecida de Souza pela atenção, amizade e paciência durante as etapas do Curso de Mestrado.

Aos amigos Antônio Máximo, Jésus e demais funcionários da biblioteca da UFLA grato pela atenção e amizade.

À Wanderleia o meu especial agradecimentos pelo companheirismo, apoio e compreensão nas horas difíceis.

Aos amigos Pedro Henrique Tomé, Celso José de Moura pela amizade, ajuda e incentivos durante as diversas etapas do curso de Mestrado.

Aos colegas Deise, Osvaldo, Pablo pela ajuda na fase experimental.

Aos colegas Cássio, Carlos, Marcelo, Disney e Patrícia pela ajuda.

Aos professores e funcionários do DCA (UFLA), colegas de pós-graduação e a todos que, de alguma forma contribuíram para o êxito deste trabalho.

# SUMÁRIO

Página

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1 Massa Específica	4
2.2 Porosidade	7
2.3 Calor	9
2.3.1 Calor sensível	9
2.3.2 Calor latente	9
2.3.3 Capacidade térmica	10
2.3.4 Calor específico	10
2.4 Condutividade Térmica	15
2.5 Difusividade térmica	24
3 MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 Colheita e preparo do café	29
3.2 Análises laboratoriais	30



3.2.1 Determinação do teor de água (% b.u.)	30
3.2.2 Porosidade (%)	31
3.2.3 Massa específica aparente ( $\text{kg. m}^{-3}$ )	33
3.2.4 Calor específico ( $\text{kJ. kg}^{-1} . ^\circ\text{C}^{-1}$ )	34
3.2.4.1 Determinação da capacidade térmica do calorímetro	35
3.2.4.2 Determinação do calor específico do produto	36
3.2.5 Condutividade Térmica ( $\text{W. m}^{-1} . ^\circ\text{C}^{-1}$ )	37
3.2.6 Difusividade térmica ( $\text{m}^2 . \text{s}^{-1}$ )	40
3.3 Análise estatística	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1 Efeito das Variedades	42
4.2 Propriedades termofísicas	48
4.2.1 Massa específica aparente	48
4.2.2 Porosidade	51
4.2.3 Calor específico	56
4.2.4 Condutividade térmica	59
4.2.5 Difusividade térmica	63
5 CONCLUSÕES	67

**6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** ----- 68

**7 ANEXOS** ----- 74

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1	Picnômetro utilizado na determinação da porosidade.....	31
2	Equipamento utilizado na determinação da massa específica aparente.....	33
3	Calorímetro utilizado na determinação do calor específico.....	34
4	Aparato utilizado na determinação da condutividade térmica....	39
5	Gráfico da massa específica aparente do café cereja descascado da variedade Catuai.....	48
6	Gráfico da massa específica aparente do café cereja descascado das variedades Catuai Vermelho e Catuai Amarelo.....	49
7	Gráfico da massa específica aparente do café cereja descascado das variedades Acaiá e Rubi.....	50
8	Gráfico da porosidade do café cereja descascado da variedade Catuai.....	52
9	Gráfico da porosidade do café cereja descascado das variedades Catuai Vermelho e Catuai Amarelo.....	53
10	Gráfico da porosidade do café cereja descascado das variedades Acaiá e Rubi.....	54

11	Corte longitudinal e transversal do fruto de café cereja.....	55
12	Gráfico do calor específico do café cereja descascado das variedades Catuai e Catuai Vermelho.....	57
13	Gráfico do calor específico do café cereja descascado das variedades Catuai Amarelo e Acaiá.....	58
14	Gráfico do calor específico do café cereja descascado da variedade Rubi.....	59
15	Gráfico da condutividade térmica das variedades Catuai e Catuai Vermelho.....	61
16	Gráfico da condutividade térmica das variedades Catuai Amarelo e Acaiá.....	62
17	Gráfico da condutividade térmica da variedade Rubi.....	63
18	Gráfico da difusividade térmica da variedade Catuai.....	64
19	Gráfico da difusividade térmica das variedades Catuai Vermelho e Catuai Amarelo.....	65
20	Gráfico da difusividade térmica das variedade Acaiá e Rubi.....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1      Resumo da análise de variância da massa específica aparente, porosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade para cinco variedades de café cereja descascado e nove teores de água.....	44
2      Resumo da análise de variância da regressão da massa específica aparente, porosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica para a variedade Catuai.....	45
3      Resumo da análise de variância da regressão da massa específica aparente, porosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica para a variedade Catucaí Vermelho.....	45
4      Resumo da análise de variância da regressão da massa específica aparente, porosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica para a variedade Catucaí Amarelo.....	46
5      Resumo da análise de variância da regressão da massa específica aparente, porosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica para a variedade Acaiá.....	46
6      Resumo da análise de variância da regressão da massa específica aparente, porosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica para a variedade Rubi.....	47

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo		Unidade
$\rho$	massa específica.....	$\text{kg.m}^{-3}$
$P$	Porosidade.....	%
$P_1$ e $P_2$	pressão de ar.....	mm.c.a.
$P_{\text{corr.}}$	porosidade corrida.....	%
$C_p$	calor específico do produto.....	$\text{kJ. kg}^{-1} .^{\circ}\text{C}^{-1}$
$C_{\text{cal}}$	capacidade calorífica do calorímetro.....	$\text{kJ. }^{\circ}\text{C}^{-1}$
$C_a$	calor específico da água.....	$\text{k.J.kg}^{-1} .^{\circ}\text{C}^{-1}$
$V$	volume.....	$\text{m}^3$
$m_1$	massa da água quente.....	kg
$m_2$	massa da água fria.....	kg
$m_p$	massa do produto.....	kg
$T_1$	temperatura. da água quente.....	$^{\circ}\text{C}$
$T_2$	temperatura da água fria.....	$^{\circ}\text{C}$
$T_3$	temperatura de equilíbrio da água.....	$^{\circ}\text{C}$
$T_4$	temperatura do produto.....	$^{\circ}\text{C}$
$T_5$	temperatura de equilíbrio.....	$^{\circ}\text{C}$
$K$	condutividade térmica.....	$\text{W. m}^{-1} .^{\circ}\text{C}^{-1}$
$Q$	potência dissipada pela fonte por unidade de comprimento.....	$\text{W.m}^{-1}$

$T_f$	temperatura final do intervalo usado para determinar a condutividade térmica.....	$^{\circ}\text{C}$
$T_i$	temperatura inicial do intervalo usado para determinar a condutividade térmica.....	$^{\circ}\text{C}$
$\theta_2$	instante final do intervalo usado para determinar a condutividade térmica.....	s
$\theta_1$	instante inicial do intervalo usado para determinar a condutividade térmica.....	s
$\theta_o$	fator de correção de tempo.....	s
$\alpha$	difusividade térmica.....	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$\gamma_{ijk}$	observação tomada na i-ésima variedade, j-ésimo teor de água e $\kappa$ -ésima repetição	
$\mu$	constante do modelo	
$v_i$	efeito da i-ésima variedade	
$\tau_j$	efeito da j-ésimo teor de água	
$\delta_{ij}$	efeito da interação da i-ésima variedade com j-ésimo teor de água	
$\varepsilon_{ijk}$	erro experimental associado a observação $\gamma_{ijk}$	
a, b, e c	coeficientes de regressão	
$d_{ij}$	efeito do desvio de regressão	
$x_j$	j-ésimo teor de água	
$\tilde{y}_{ij}$	média do j-ésimo teor de água.	

## RESUMO

**RIBEIRO, Ruben César de Maria Souza. Determinação das Propriedades Termofísicas de Café Cereja Descascado. LAVRAS: UFLA, 2001. 79p. (Dissertação - Mestrado em Ciência dos Alimentos)\***

Este trabalho foi desenvolvido na Universidade Federal de Lavras e no Laboratório de Propriedades Físicas e Avaliação de Qualidade de Produtos Agrícolas do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem - CENTREINAR, localizado na Universidade Federal de Viçosa - M.G. O objetivo deste trabalho foi determinar algumas propriedades termofísicas e ajustar equações matemáticas para relacionar essas propriedades com o teor de água de cinco diferentes cultivares de café em pergaminho. Foram determinadas a massa específica aparente, a porosidade, o calor específico, a condutividade térmica e a difusividade térmica das variedades Catuaí, Catucaí vermelho, Catucaí amarelo, Acaiaí e Rubi. Nove níveis de umidade entre 9 e 50% (b.u.) foram obtidos retirando-se a água dos grãos em estufa com ventilação forçada com temperatura de 60 °C. Após a secagem, o teor de água foi determinado usando-se o método padrão de estufa a  $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas. A massa específica foi calculada a partir da relação entre a massa e o volume de grãos. A determinação da porosidade foi feita num picnômetro de comparação a ar. O calor específico foi determinado utilizando o método das misturas. Para determinação da condutividade térmica empregou-se o método do cilindro teoricamente infinito para conter as amostras, considerando o processo transiente para medir a temperatura. 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. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que, os valores observados ajustaram-se melhor a uma equação polinomial do segundo grau, e que, exceto a massa específica e a porosidade, as propriedades analisadas no café em pergaminho apresentaram comportamento, em função do teor de água, semelhante à maioria dos produtos agrícolas já estudados, ou seja, o calor específico e a condutividade térmica aumentaram com a elevação do teor de água enquanto a difusividade térmica diminuíram com o aumento do teor de água do produto. Não foi possível ajustar um modelo matemático único que explicasse as variações das propriedades estudadas em função do teor de água para as cinco variedades.

---

\* Comitê Orientador: Flávio Meira Borém - UFLA (Orientador), Paulo César Corrêa - UFV.



## ABSTRACT

RIBEIRO, Ruben César de Maria Souza. **Determination of the Physical and Thermal Properties of Peeled Cherry Coffee.** LAVRAS: UFLA, 2001. 79p. (Dissertation - Food Science)\*

This research work was developed in the Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Brazil and in the Laboratório de Propriedades Físicas e Avaliação da Qualidade de Produtos Agrícolas – CENTREINAR, located in the Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brazil. The objective of this work was to determine some physical and thermal properties of peeled cherry coffee and adjust a model for correlation this properties and moisture content of five different coffee varieties in parchment. The apparent specific mass, the porosity, specific heat, thermal conductivity and the thermal diffusivity were measured for the following varieties: Catuaí, Catucaí vermelho, Catucaí amarelo, Acaia and Rubi. Nine level of moisture content between 9 to 50% (w.b) were obtained by extracting water using an oven with forcing air circulation at 60° Celsius degree. After drying process, the moisture content was determined by the standard oven method at  $105 \pm 3^\circ$  Celsius degree during 24 hours. The specific mass was calculated by the relation mass and grain volume. The porosity was determined using the air-comparison pycnometer. The specific heat was obtained using the mixture method. The thermal conductivity was obtained using the method of the theoretically infinite cylinder, considering the transient process to measure the temperature. The thermal diffusivity were obtained indirectly using the experimental data of the thermal conductivity, the specific heat and the apparent specific mass. The experimental data of those properties were submitted to a regression analysis. The second-degree polynomial equation presented better adjust for the obtained data. The physical and thermal properties of coffee in parchment presented a behavior similar to the majority grains depending on the moisture content excepted for the specific mass and porosity. The specific mass, the specific heat and the thermal conductivity increase with the raise of moisture content while the thermal diffusivity and the porosity reduce with the elevation of product moisture content. It was not possible to adjust a single mathematical model for the five varieties, which points out an interaction effect of the moisture content and the varieties.

---

\* Guidance Committee: Dr. Flávio Meira Borém - UFLA (Major Professor), Dr. Paulo César Corrêa - UFV.

## INTRODUÇÃO

O processamento do café, com as constantes inovações e fomento de tecnologia, vem se transformando através dos tempos.

O café depois de colhido tem sido processado de formas distintas: mantendo-se o fruto intacto (café em coco); removendo-se apenas a casca (descascado); removendo-se a casca e a mucilagem mecanicamente (desmucilado), ou removendo-se a mucilagem por meio de fermentação controlada (despolpado).

Recentemente, diversos produtores têm optado pelo processamento do café cereja descascado tanto pela redução que representa na área ocupada no terreiro, aumentando, assim, sua capacidade de processamento, como também pela melhoria de qualidade e redução do custo de secagem. No entanto, algumas técnicas utilizadas após a colheita como o descascamento, assim como a retirada de parte da mucilagem dos frutos maduros, têm-se mostrado eficientes na melhoria desta qualidade. A melhoria na qualidade pode ser observada no sabor e aroma final do produto. Como a casca e parte da mucilagem são removidas, o teor inicial de água do produto durante a secagem é menor, reduzindo, assim, o tempo e o custo para a secagem completa.

Durante seu processamento e armazenamento, o café passa por várias etapas em que sua temperatura e umidade podem sofrer alterações. Conhecer como essas alterações ocorrem e saber controlá-las é fundamental para garantir maior eficiência nos processos e melhor qualidade no produto final. Apesar do desenvolvimento tecnológico obtido até o momento, algumas operações empregadas no manuseio do café precisam ainda ser entendidas com maiores detalhes, como, por exemplo, os fenômenos que regem as propriedades químicas e termofísicas dos materiais biológicos. Propriedades como a massa específica aparente, porosidade, calor específico, condutividade e difusividade térmica são

relevantes em estudos de aerodinâmica e transferência de calor e massa de grãos. A otimização dos processos industriais e o desenvolvimento de novos projetos e equipamentos que envolvem transferência de calor e massa de grãos baseiam-se em generalizações, por vezes não muito claras, de seus parâmetros, o que acarreta maiores custos e qualidade inferior no produto final. A caracterização precisa dessas propriedades torna-se, portanto, de grande importância. Entretanto, pouco se sabe a respeito destas propriedades termofísicas para o café cereja descascado.

Considerando a franca expansão do uso do café cereja descascado no processamento do café, as vantagens que esse processamento apresenta em relação à melhoria de qualidade e redução de custos, e a escassez de literatura referente às propriedades termofísicas de café descascado, este trabalho buscou determinar as variações das propriedades termofísicas da massa granular de cinco diferentes variedades de café cereja descascado em função do teor de água.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O café depois de colhido pode ser processado de formas distintas, mantendo-se o fruto intacto, ou seja, o fruto é processado na sua forma integral, com casca, comumente denominado café em coco; removendo-se apenas a casca e a polpa (descascado); removendo-se a casca, polpa e a mucilagem mecanicamente (desmucilado); ou removendo-se a mucilagem por meio de fermentação controlada após remoção da casca e polpa (despolpado).

Segundo Dias e Barros (1993), o uso do cereja descascado no processamento do café tem, ultimamente, sofrido modificações com o objetivo de simplificação do processo. Uma destas modificações é a utilização do descascamento sem a fase de fermentação ou retirada da mucilagem, ou seja, após a etapa de retirada da casca, o produto é submetido diretamente à secagem com parte de sua mucilagem.

O descascamento dos frutos maduros tem se mostrado eficiente na melhoria da qualidade final do café, com vantagens econômicas. Além disso, o processamento do café cereja descascado pode representar uma redução de até 40% na área necessária para o terreiro, como também uma redução no tempo total de secagem, o que, além de reduzir os riscos de ocorrerem alterações indesejáveis no café, reduz o custo final da secagem.

Diversos fatores, principalmente os que atuam após a colheita do café, têm sido demonstrados como causadores de modificações indesejáveis e prejudiciais à qualidade do produto. A racionalização dos diferentes processos empregados no controle e a conservação da qualidade do café depois da colheita requerem o estudo da transferência de calor e de massa, juntamente com a descrição de fenômenos a elas associados. Modificações termofísicas em produtos agrícolas submetidos aos processos de secagem, aeração e armazenagem, decorrentes de mudanças da concentração de água no interior do

produto, podem ser calculadas com base em equações matemáticas que levem em consideração as relações existentes entre essas propriedades e seu teor de água. Relações desta natureza já foram descritas para diversos produtos agrícolas; Entretanto, não foram encontradas na literatura consultada estudos que descrevessem alterações nas propriedades termofísicas do café cereja descascado em função do teor de água para diferentes variedades.

## 2.1 Massa Específica

Segundo Mohsenin (1972), a massa específica de um material é a razão entre a massa e o volume do material, podendo ser aparente ou real. A massa específica aparente inclui o volume do espaço intergranular, enquanto a massa específica real considera apenas o volume ocupado pela massa granular.

A massa específica de produtos agrícolas pode ser calculada a partir da Equação 1.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Equação (1)}$$

em que:

$\rho$  : massa específica ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );

$m$  : massa (kg);

$V$  : volume ( $\text{m}^3$ ).

Os valores da massa específica real e da massa específica aparente podem ser usados para determinar a porosidade de produtos granulares. O conhecimento das variações da massa específica é um passo importante para entender melhor as propriedades de produtos agrícolas.

Segundo Jayas, Sokhansanj e White, (1989), a massa específica aparente de grãos é influenciada pelo seguintes parâmetros: massa dos grãos, massa específica aparente do grão seco, teor de água do grão e tamanho da medida do

recipiente. No ambiente de laboratório, a massa específica aparente é difícil de ser determinada porque o grau de compactação depende do método usado para encher um recipiente. Além disso, o sentido e a altura de queda dos grãos, durante o enchimento do recipiente usado no teste, também influenciam a massa específica aparente.

Chung e Converse (1969), usando um picnômetro de comparação de ar no estudo relativo aos efeitos de teor de água nas propriedades físicas de grãos, notaram que havia um aumento da massa específica do milho com a redução do teor de água. Eles notaram que a mudança da massa específica real em comparação com a massa específica aparente foi pequena. Constataram também que a massa específica real foi afetada pelo formato do grão.

A determinação do volume de grãos agrícolas e da massa específica apresenta certos problemas devido à forma irregular, ao pequeno tamanho e à natureza porosa desses materiais. O método mais comum para a determinação da massa específica de grãos é o deslocamento de um fluido.

Moreira, Chaves e Oliveira (1985), testando a equivalência de três líquidos, tolueno, água destilada e óleo de soja, na determinação da massa específica aparente de vários grãos agrícolas, constataram que a utilização do óleo de soja e tolueno como líquido resultou em valores de massa específica iguais. Porém, a água, usada como líquido complementar de volume, resultou em valores de massa específica menores, resultantes da absorção da água no produto, o que não ocorreu com o tolueno e o óleo de soja.

Browne (1962) relata que há dois métodos comuns para determinar a massa específica de grãos. Em um processo emprega-se o deslocamento de um líquido, em outro, do ar. O método de deslocamento de líquido tem a vantagem de requerer, apenas, equipamentos comuns de laboratório. O método de deslocamento de ar requer um aparato especial denominado picnômetro. Com

este método, dificuldades podem surgir, tais como variação de temperatura e vazamentos de ar, mas ele tem a vantagem de ser relativamente rápido.

Chandrasekar e Viswanathan (1999), estudando algumas propriedades termofísicas de café descascado das espécies arábica e robusta, concluíram que a massa específica aparente aumentou linearmente, para ambas as espécies, com o aumento do teor de água. na faixa de 9,9 a 30,6%(b.u.).

Couto et al (1999), analisando o efeito do teor de água na faixa de 18,6% a 62,6% (b. u.), nos valores da massa específica aparente de café em coco das variedades Catuaí e Timor, em dois estádios de maturação (verde e cereja), colhidos em épocas diferentes, verificaram que a época de colheita não apresentou alterações relevantes nos valores. Constataram também que a massa específica aparente variou, em média, de 391,3 a 606,6 kg.m<sup>-3</sup>, aumentando com o aumento do teor de água em todo intervalo testado.

Afonso Júnior e Corrêa (2000), utilizando frutos de café da variedade catuaí vermelho, colhidos com teor de água de 50,7 % (b.u.) e processados por via seca e úmida, constataram que a massa específica aparente eleva-se com a elevação do teor de água, independentemente do tipo de processamento.

Jayas, Sokhansanj e White (1989), estudando a influência do teor de água na massa específica aparente de grãos de canola, verificaram que com o aumento do teor de água na faixa de 6,5 a 14,5% (b.u.), a massa específica aparente decresce.

Almeida (1979) concluiu que a massa específica aparente de amêndoas de cacau decresce linearmente com o aumento do teor de água. Sasseron (1984), estudando o mesmo produto, obteve comportamento semelhante, não observando, no entanto, um comportamento linear, ajustando melhor os dados a uma equação de terceiro grau.

Gustafson e Hall (1972) empregaram um picnômetro de Hélio-ar para verificar mudanças da massa específica de milho, em função do teor de água.

Notaram que a massa específica aumentou durante a secagem, ou seja, a massa específica aumentou com o decréscimo do teor de água, estabelecendo uma relação linear.

Kazarian e Hall (1965), estudando as propriedades físicas de produtos agrícolas, verificaram que, para o trigo branco macio, a massa específica pareceu bastante constante para níveis de umidade de 0 a 10% (b.u.) e acima deste valor decresceu com o aumento do teor de água, obtendo os mesmos resultados para o trigo amarelo.

## 2.2 Porosidade

Segundo Mohsenin (1972), os espaços intergranulares de uma massa granular, como ocorre no caso de grãos e sementes, é denominado de porosidade, podendo seu valor ser obtido pela relação entre o volume ocupado pelo ar existente na massa granular e o volume total ocupado pela mesma massa.

Sasseron (1984) define a porosidade como a quantidade de espaços vazios ocupados pelo ar existente em uma massa de grãos, podendo variar de 30 a 50 %. A porosidade pode ser determinada por métodos diretos, como por exemplo, medindo-se o volume de líquidos acrescentados à massa de grãos, ou por métodos indiretos, como o uso de picnômetro de comparação a ar. O autor menciona que a porosidade sofre influência do teor de água do produto, da porcentagem de quebrados e de impurezas.

Segundo Mohsenim (1972), porosidade, expressa em porcentagem, determinada por meio do método indireto usando o picnômetro, pode ser calculada a partir da Equação 2.

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \times 100 \quad \text{Equação (2)}$$

em que:

P : porosidade (%);



$P_1$  : pressão do ar no cilindro 1 (mm.c.a.);

$P_2$  : pressão do ar de equilíbrio do cilindro 1 e 2 (mm.c.a.).

Segundo Rossi e Roa (1980), conhecendo-se a massa específica aparente ( $\rho_{ap}$ ) e a massa específica real ( $\rho_r$ ) do produto, o valor da porosidade (P) do produto pode ser calculado mediante a Equação(3).

$$P = 1 - \left( \frac{\rho_{ap}}{\rho_r} \right) \quad \text{Equação. (3)}$$

Couto et al (1999), estudando a porosidade de grãos de café em coco da variedade catuai e timor, contendo grãos verdes e cerejas, verificaram uma variação da porosidade de 38,8 a 53,0%, concluindo que esses valores encontram-se na mesma faixa da maioria dos grãos agrícolas. Segundo os autores, a porosidade, em função do teor de água, aumentou com o aumento do teor de água, até um valor máximo e, a seguir, decresce.

Chandrasekar e Viswanathan (1999), estudando propriedades termofísicas de café descascado das espécies arábica e robusta, concluíram que a porosidade diminuiu com o aumento do teor de água na faixa de 9,9 a 30,6% (b.u.).

Segundo Almeida (1979), a porosidade de amêndoas de cacau decresce com o aumento do teor de água, obtendo uma relação linear. Prado (1978), estudando a variação da porosidade e utilizando um picnômetro de comparação a ar, constatou que a porosidade de amêndoas de cacau durante a secagem a 60 e 80°C decresce com a elevação do teor de água, sendo que uma relação exponencial foi a que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Afonso Júnior e Corrêa (2000), estudando a contração volumétrica dos grãos de milho durante o processo de dessecamento, verificaram que a porosidade da massa granular de milho diminuiu com a redução do teor de água, obtendo uma relação linear. Os autores relataram, também, que este resultado está

associado à desidratação dos grãos, que reduz os espaços intercelulares, modificando as suas dimensões.

Gustafson e Hall (1972), empregando um picnômetro de Hélio-ar para verificar mudanças da porosidade de grãos de milho em função do teor de água, obtiveram uma relação quadrática.

Segundo Jayas, Sokhansanj e White (1989), a porosidade de grãos de canola aumentou de 38,4 a 70,6%, com o aumento do teor de água na faixa de 6,5 a 7,7% (b.u.).

## **2.3 Calor**

Segundo Pauli, Mouad e Heilmann (1978), calor é o agente físico responsável pelas variações de temperatura, mudanças no estado de agregação dos corpos (vaporização dos líquidos, fusão dos sólidos, etc.), dilatações e contrações que ocorrem em função das variações do estado térmico dos corpos.

### **2.3.1 Calor sensível**

Um determinado sistema pode receber ou ceder calor mantendo seu estado de agregação, acusando, porém, uma variação de temperatura. O calor trocado é dito calor sensível (Pauli, Mouad e Heilmann, 1978).

### **2.3.2 Calor latente**

Quando um sistema que recebe ou cede calor, não acusando variação de temperatura, porém apresentando mudança no estado de agregação, o calor trocado com o exterior é dito calor latente, ou seja, calor latente é aquele que é removido do sistema sem que este sofra variação de temperatura (Pauli, Mouad e Heilmann, 1978).

### 2.3.3 Capacidade térmica

A capacidade térmica é a grandeza física que permite prever dentro de um dado conjunto de corpos, onde cada um cede ou recebe a mesma quantidade de calor, qual deles estará mais quente ou mais frio, ao completar a troca de calor. A capacidade térmica depende de sua massa.

Seja  $\Delta Q$  a quantidade de calor que um sistema troca com o exterior e  $\Delta t$  a conseqüente variação de temperatura do sistema. Por definição, denomina-se capacidade térmica de um corpo a razão entre a quantidade de calor fornecida ou cedida pelo sistema e a correspondente variação de temperatura (Pauli, Mouad e Heilmann, 1978). Indicando  $\Delta Q$  apenas por  $Q$ , vem:

$$C = \frac{Q}{\Delta t} \quad \text{Equação (4)}$$

em que:

$C$  : capacidade térmica do corpo ( $J \cdot ^\circ C^{-1}$ );

$Q$  : quantidade de calor trocada pelo corpo (J);

$\Delta t$  : variação de temperatura do corpo ( $^\circ C$ ).

### 2.3.4 Calor específico

O calor específico é a grandeza física que permite prever, dentro de um conjunto de amostras de materiais diversos, todas de mesma massa, qual delas que, recebendo ou cedendo a mesma quantidade de calor, estará mais quente ou mais fria ao finalizar a troca de calor. O calor específico é a quantidade de calor que é absorvida ou perdida por uma unidade de peso do produto para se efetuar uma variação na temperatura, ou seja, é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de um corpo de  $1^\circ C$ , por unidade de massa, sem mudança de estado. Assim, o calor específico de um material não depende da massa utilizada (Singh e Heldman, 1984 citado por Pinheiro, 1998). A relação entre

calor específico, massa e a capacidade térmica de um produto é dada pela Equação 5.

$$C_p = \frac{C}{m} \quad \text{Equação (5)}$$

em que:

$C_p$  : calor específico de um dado material ( $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ );

$C$  : capacidade térmica do corpo ( $J.^{\circ}C^{-1}$ );

$m$  : massa da amostra do material (kg).

A disponibilidade do valor do calor específico é de fundamental importância na determinação da quantidade de energia requisitada nos processos de aquecimento e resfriamento de alimentos, pois este valor fornece a amplitude da energia envolvida e necessária para o dimensionamento de equipamento.

A variação de pressão para os processos que envolvem transferência de calor em materiais agrícolas é muito pequena. Em decorrência deste fato, utiliza-se o conceito de calor específico à pressão constante.

Existem vários métodos para determinar o calor específico que se baseiam no equilíbrio térmico estabelecido entre o corpo cujo calor específico se pretende determinar e um segundo corpo de calor específico conhecido. De acordo com Almeida (1979) e Drouzas e Saravacos (1988), pode-se também calcular o calor específico conhecendo-se a condutividade térmica, a difusividade térmica e a massa específica do material.

O método mais usado, segundo vários autores, entre eles Kazarian e Hall (1965) e Mohsenin (1980), é o da mistura direta, que consiste em utilizar um recipiente isolado (calorímetro), de capacidade calorífica conhecida, com um líquido inerte. A amostra, a uma temperatura diferente da do líquido calorimétrico, é colocada no recipiente e a temperatura de equilíbrio é medida. O calor específico do produto é calculado pela equação (6).

$$C_p \cdot m_p \cdot (T_5 - T_4) = C_a \cdot m_l \cdot (T_3 - T_5) + C_{cal} \cdot (T_3 - T_5) \quad \text{Equação (6)}$$

em que:

$C_p$  : calor específico do produto ( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ );

$C_a$  : calor específico da água ( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ );

$C_{cal}$  : capacidade calorífica do calorímetro ( $\text{kJ.°C}^{-1}$ );

$m_p$  : massa de produto (kg);

$m_1$  : massa de água (kg);

$T_4$  : temperatura do produto ( $\text{°C}$ );

$T_3$  : temperatura da água ( $\text{°C}$ );

$T_5$  : temperatura de equilíbrio ( $\text{°C}$ ).

Chandrasekar e Viswanathan (1999) citam que de forma similar a outros materiais biológicos, o calor específico de grãos de café descascado das espécies arábica e robusta aumentou com a elevação do teor de água.

Almeida (1979) obteve uma relação linear determinando o calor específico de amêndoas de cacau em três níveis de umidade, na qual constatou que o aumento do calor específico está associado ao aumento do teor de água. Sasseron (1984), trabalhando com o mesmo material em seis níveis de umidade, obteve o mesmo comportamento para o calor específico, ajustando-se melhor por uma função quadrática. O autor menciona complicações na fase experimental da determinação do calor específico, tais como: (1) a agitação do sistema pode dissipar energia e afetar o equilíbrio térmico real; (2) a ineficiência da homogeneização da mistura em razão da permanência de camadas estratificadas; (3) o tempo necessário para atingir o equilíbrio pode afetar a troca de calor calorímetro-ambiente, apesar do isolamento térmico; (4) a existência do calor de sorção e dessorção.

Kazarian e Hall (1965); Parker e Friesen (1968) e Disney (1954), entre outros, tiveram dificuldade em reconhecer o calor específico de materiais biológicos. Esta dificuldade é devida ao alto teor de água do material, ao calor

de sorção e dessorção, movimentos internos de umidade e outros processos internos reversíveis e irreversíveis. Estas dificuldades acontecem, pelo menos em parte, por falta de conhecimento do calor específico de materiais biológicos.

... Hwang, Hayakawa e Kan-Ichi (1979), determinando o calor específico de tomates, biscoitos e trigo, utilizando um calorímetro adaptado, adaptaram a técnica, da mistura direta para alimentos de alta higroscopicidade. Nesta técnica isolou-se a amostra eliminando o contato direto entre a amostra e o líquido calorimétrico utilizado, evitando, com isto, o calor de absorção e reações químicas que poderiam ocorrer com o contato do líquido com o produto. Segundo os autores, a reprodutibilidade e a precisão desta técnica foram examinadas em vários produtos e podem ser usadas para produtos desidratados e de alto teor de água, proporcionando resultados excelentes, comparados a valores da literatura.

Afonso Júnior e Corrêa (2000), estudando frutos de café, processados por via seca e úmida., Verificaram que o valor do calor específico para o café descascado variou de 1,23 a 2,47  $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ , para teores de água variando de 0,111 a 0,597 (b.s.). Já para o café em coco, o calor específico foi de 1,22 a 2,53  $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ , para teores de água variando de 0,111 a 0,678 (b.s.), e para o café despulpado, o valor foi de 1,13 a 2,39  $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ , para teores de água variando de 0,111 a 0,621 (b.s.). Notaram, também, que o aumento do calor específico está associado ao aumento do teor de água do produto, independente da forma de preparo.

Corrêa e Moure (2000), analisando sementes de sorgo, verificaram um aumento do calor específico em função do teor de água, ajustando-se melhor aos dados experimentais uma relação linear.

Corrêa et al. (2000), estudando a variação dessa propriedade em frutos de café de diferentes variedades, verificaram que o aumento do calor específico está diretamente associado ao aumento do teor de umidade do produto.

Muir e Viravanichal (1972), estudando o efeito do calor específico no armazenamento e época de colheita do trigo primavera vermelho duro (Canadense), verificaram, para essa propriedade, um aumento em função do teor de água do produto, constatando-se um comportamento linear num intervalo de temperatura de  $-33,5$  a  $21,8^{\circ}\text{C}$ , para níveis de umidade na faixa de 1 a 19% (b.u.), e descrevendo um comportamento não linear para níveis de umidade na faixa 23,4 a 29,6%, para faixa de temperatura de  $-33,5$  a  $0^{\circ}\text{C}$ . Acima de  $0^{\circ}\text{C}$ , obteve-se o comportamento linear.

Sharma e Thompson (1973), estudando a relação de cinco diferentes níveis de umidade com a condutividade térmica e com o calor específico de grãos de sorgo, observaram que o calor específico aumenta com a elevação do teor de água, descrevendo um comportamento linear. Os autores relatam complicações na determinação do calor específico usando o processo das misturas. O grão de sorgo, após ser introduzido no calorímetro com água, absorveu alguma umidade, originando um calor conhecido como calor de hidratação. Este calor surge pelo aumento da temperatura e pela diminuição de umidade do grão. Isto tem sido obtido calorimetricamente para vários outros produtos higroscópios, para os quais o calor de hidratação aumenta com o decréscimo do teor de água.

Wright e Porterfield (1970), estudando a diferença do calor específico devido à maturidade do amendoim em função do teor de água, verificaram que o calor específico eleva-se com o aumento do teor de água do grão, descrevendo uma equação não linear. Relataram também que o calor de sorção do amendoim foi melhor representado para teor de água absorvida entre a faixa de 0 a 0,05 de umidade, (b.s.). Acima de 0,05 de umidade (b.s.), este resultado parece ser insignificante.

## 2.4 Condutividade Térmica

Segundo Incropera e Dewitt (1992), toda vez que houver uma diferença de temperatura num meio, ou entre vários meios, a transferência de calor ocorre obrigatoriamente. Esses autores relatam que a condutividade térmica representa a propriedade que relaciona a taxa com que o fluxo de calor escoou através do material, em função da existência de um gradiente de temperatura. A condutividade térmica de um material é a medida da sua capacidade para conduzir calor. Nos alimentos, a condutividade térmica depende principalmente da composição, mas também da presença de espaços vazios e de sua homogeneidade.

Segundo Mattos e Martins (1998), a condução de calor pode ser descrita, como a transferência de calor associada à movimentação de partículas (moléculas, átomos, elétrons) de uma substância, sem apreciar deslocamento ou fluxo destas partículas. Este modo de transferência de calor depende de uma propriedade da substância chamada coeficiente de condutividade térmica.

Stolf (1972) caracteriza o coeficiente de condutividade térmica como sendo uma constante de proporcionalidade, específica para cada material, e que relaciona o fluxo de calor por condução através do material em função do gradiente de temperatura.

Segundo Stolf (1972) e Maroulis, Shah e Saravacos (1991), a maior parte dos materiais biológicos não é considerada como substância pura, homogênea. Portanto, a determinação das propriedades termofísicas pode variar de amostra para amostra, devido à variação de estrutura, composição, densidade, teor de água e porosidade. Devido à existência dessa massa granular porosa nestas substâncias, deve ser observada a massa de ar presente na massa total do produto, ou seja, deve ser considerada a determinação aparente destas propriedades. A transferência de energia calorífica através de uma massa granular é um processo complexo em razão da porosidade do produto, uma vez



que a quantidade de calor que atravessa o material ocorre por condução e convecção entre os grãos e o ar intergranular.

Segundo Almeida (1979), a condutividade térmica é a taxa de energia que flui por condução por unidade de tempo, normal à superfície de área unitária, quando se estabelece um gradiente de temperatura 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. De acordo com Almeida (1979), citado por Sasseron (1984), a medição da condutividade térmica é complexa, em razão do transporte simultâneo do calor e massa, das reações químicas, das mudanças estruturais e biológicas que ocorrem durante o processamento pós-colheita.

Reidy e Ripeen (1971) e Mohsenin (1975) relataram que o método de medição de condutividade térmica em regime estacionário consiste da resolução da equação de condução de calor em estado estacionário, para placas paralelas, cilíndricas ou esferas concêntricas. Este método não é recomendável para materiais biológicos, principalmente devido ao longo período de tempo necessário para atingir o regime estacionário, possibilitando a migração de umidade devido à diferença de temperatura no grão durante um longo período de tempo, podendo ocorrer transformações físico-químicas no produto durante os testes. Menciona-se, também, que podem ocorrer erros na medição do fluxo de calor e da temperatura, mau contato entre o aquecedor e a amostra, transferência de calor por convecção na massa que compõe a amostra e diferenças entre amostras. Estas dificuldades podem ser minimizadas pelo método de fluxo de calor transiente, com um período de teste consideravelmente reduzido.

De acordo com Bilanski e Fisher (1976) e Fortes e Okos (1980), o método transitório consiste em introduzir no material uma fonte linear de energia e medir a temperatura, com um termopar, no ponto médio da fonte.

Chandrasekar e Viswanathan (1999) concluíram que a condutividade térmica de café descascado das espécies arábica e robusta aumentou com o aumento do teor de água.

Fortes e Okos (1980) obtiveram, para o milho, um crescimento linear da condutividade térmica em função do aumento do teor de água. Bilanski e Fisher (1976), trabalhando com semente de colza, na faixa de 6,1 a 32,7% de umidade (b.u.) e temperatura de 4,4 a 31,7°C, obtiveram o mesmo comportamento, sendo que a condutividade térmica para colza, de um modo geral, variou de 0,0625 a 0,0881 (W.m<sup>-1</sup>.k<sup>-1</sup>). Almeida (1979) e Sasseron (1984) obtiveram, para sementes de amêndoas de cacau, um crescimento linear da condutividade térmica com a elevação do teor de água.

Segundo Muir e Chandra (1970), Sharma e Thompson (1973), Rossi et al (1982) e Park, Alonso e Nunes (1999), a equação abaixo foi utilizada para descrever o fluxo de calor com uma fonte linear:

$$\frac{\partial T_p}{\partial \theta} = \alpha \left[ \frac{\partial^2 T_p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_p}{\partial r} \right] \quad \text{Equação (7)}$$

em que:

$\theta$  : tempo (s);

$\alpha$  : difusividade térmica (m<sup>2</sup>. s<sup>-1</sup>);

$r$  : distância radial da fonte de calor (m).

$T$  : temperatura da massa de grãos, no tempo  $\theta$  e posição  $r$ .

Wratten et al (1969), na determinação da condutividade térmica de arroz, relatam que a equação diferencial parcial básica para expressar temperatura em função da distância  $r$  da fonte de calor é dada pela equação(6), e sua solução foi apresentada por Kazarian e Hall (1965), a qual é apresentada pela equação (7). Constataram também um comportamento linear da condutividade térmica do arroz, que aumentou em função do aumento do teor de água.

Basicamente, são utilizados na determinação da condutividade térmica o método estacionário e o método transiente.

Os métodos de regime transiente consistem em resolver a equação de condução de calor para regimes transientes com o uso de diferentes arranjos geométricos. Dos métodos apresentados na literatura, o método usado por De Vries (1952) para a determinação da condutividade térmica do solo, readaptado por Sweat e Haugh (1974) para alimentos, parece ser o mais adequado para materiais biológicos. Para utilização deste método, um termopar e um fio aquecedor são colocados no interior de uma agulha hipodérmica (sonda), que é inserida na amostra cilíndrica. Quando o registrador, ligado ao termopar da sonda, indicar uma temperatura constante, faz-se passar uma corrente elétrica no fio aquecedor, registrando-se a curva de aquecimento indicada pelo termopar (a curva de temperatura). A condutividade térmica pode ser calculada pela equação (8):

$$K = \frac{Q}{4 \pi (T_2 - T_1)} \cdot l_n \left( \frac{\theta_2}{\theta_1} \right) \quad \text{Equação. (8)}$$

em que:

$K$  : condutividade térmica;

$Q$  : potência por unidade de comprimento dissipada no fio aquecedor pela fonte linear;

$\theta$  : tempo;

$T_1$  e  $T_2$  : temperaturas no instante  $\theta_1$  e  $\theta_2$ .

Esta é a equação para temperatura de uma fonte térmica linear colocada num meio infinito. A Equação (8) foi obtida admitindo-se uma fonte de calor linear, de comprimento infinito, num meio homogêneo. Entretanto, na prática, a amostra é finita, a fonte tem comprimento finito, a intensidade da corrente elétrica não é perfeitamente constante, o raio e a massa da fonte não são nulos e suas propriedades térmicas diferem do material em teste, conforme afirmam

Chandra e Muir (1971), Sharma e Thompson (1973), Almeida (1979) e Sasseron (1984).

Segundo Sweat e Haugh (1974); Passos, Fortes e Mello (1982), a Equação (7), em princípio, fornece os valores diretos da condutividade térmica. Entretanto, para compensar efeitos de comprimento da agulha, inércia térmica do sistema e outros erros, costuma-se acrescentar um termo de correção. Aconselha-se, portanto, a calibragem do sistema, empregando, para isso, a glicerina, já que sua condutividade térmica é conhecida. Em consequência dos pequenos intervalos de tempo e pequenos gradientes de temperatura envolvidos, o efeito relativo ao mecanismo de transferência de energia por convecção é desprezível.

Passos, Fortes e Mello (1982), utilizando o método transiente pelo processo de sonda, obtiveram, para a condutividade térmica de pastas de mandioca de diferentes variedades, um aumento em função do teor de água e valores médios entre  $0,420$  e  $0,501 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ , para teores de água variando de  $75,8$  a  $90,6\%$  (b.u.), descrevendo uma relação linear em seu comportamento.

Segundo Morita e Singh (1979), as sondas com fontes lineares de energia, utilizadas para medir condutividade térmica, que possuem uma relação comprimento diâmetro maior que 20, geram erros inferiores aos experimentais, e as condições do experimento devem ser tais que a superfície externa da amostra permaneça a uma temperatura constante durante a medição, para que se possa considerar a amostra como meio de dimensões infinitas. Desta forma, a variação da temperatura será função da espessura e das propriedades térmicas da amostra, do tempo e da extensão da fonte de calor.

Para Pietrobon, Pereira e Freire (1988), a relação comprimento diâmetro maior que 50 apresenta bons resultados para líquidos, e uma sonda bem projetada e operada com cuidados necessários nem sempre mostra bom desempenho nos testes. Isto é uma característica da sonda, levando-se à

conclusão de que as mesmas devem ser testadas e selecionadas para aplicações específicas.

Segundo Stolf (1972), o método de placas paralelas consiste de três placas superpostas, com a placa quente colocada entre duas placas frias, formando-se uma disposição em forma de sanduíche com o material em teste. A placa quente é aquecida por resistência elétrica, enquanto as duas externas são resfriadas com solução de álcool até  $-30^{\circ}\text{C}$ . A condutividade térmica é dada pela fórmula de Fourier, conforme é apresentado na equação (9).

$$q = \frac{KA}{L} \cdot \Delta t \quad \text{Equação. (9)}$$

em que:

q : quantidade de calor por unidade de tempo ( $\text{K.cal.h}^{-1}$ );

A : área da seção transversal;

L : espessura da camada;

$\Delta t$  : diferença de temperatura entre as placas frias e a quente;

K : coeficiente de condutividade térmica.

Lentz (1961) utilizou o método de placas paralelas na determinação da condutividade térmica de diferentes espécies de carnes e vários tipos de gordura, numa faixa de temperatura de 5 a  $-25^{\circ}\text{C}$ . Verificou que a condutividade térmica variava em função da direção das fibras da carne, observando que na direção das fibras seu valor foi de 15 a 30% maior do que no sentido transversal.

Hooper e Lepper (1950), citados por Kazarian e Hall (1965), foram os primeiros a utilizar o método transiente para determinar a condutividade térmica. Kazarian e Hall (1965), utilizando a condução de calor em regime transiente, constataram que a condutividade térmica do trigo e milho aumentou com a elevação do teor de água, descrevendo uma relação linear.

Muir e Chandra (1970); Sharma e Thompson (1973) e Chang (1986) indicaram que a condutividade térmica de uma massa granular pode ser obtida

por coordenadas cilíndricas. Segundo os autores, o fator de correção  $\theta_0$  pode ser calculado como uma função do logaritmo dos valores de tempo e das diferenças entre as temperaturas observadas ao longo do tempo e a temperatura inicial do sistema. A condutividade térmica (K) pode ser obtida por coordenadas cilíndricas, pela Equação (10).

$$K = \frac{Q}{4\pi (T_{P2} - T_{P1})} \cdot \ln \left( \frac{\theta_2 - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} \right) \quad \text{Equação (10)}$$

em que:

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

Q : calor fornecido ao fio resistor (W);

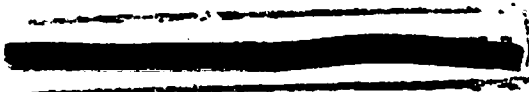
$T_{P0}$  : temperatura do produto no tempo  $\theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\theta$  : tempo (s);

$\theta_0$  : fator de correção (s).

A diferença do calor de absorção entre o aquecedor pode ser considerada como uma produção de calor antes de iniciar a medição do tempo. Isto é, o tempo  $\theta_0$  é subtraído de cada tempo observado. De acordo com Chang (1986), o fator de correção ( $\theta_0$ ) pode ser determinado por tentativas e erros de dados experimentais. Segundo os autores, estudando vários produtos agrícolas, a condutividade térmica aumentou com o aumento do teor de água, descrevendo uma relação linear.

Segundo Afonso Júnior e Corrêa (2000) para a obtenção do fator de correção  $\theta_0$ , faz a regressão dos incrementos de temperatura, em função do logaritmo natural dos intervalos de tempo, obtendo o termo de correção de tempo  $\theta_0$  através do arredondamento exponencial dos valores (a/b), obtidos a partir da equação de regressão para cada repetição da determinação da condutividade térmica.

  
Passos, Fortes e Mello (1982), Sasseron (1984), Lopes Filho (1983) e Vieira (1991) determinaram a variação da condutividade térmica em alguns produtos biológicos, em função de seu teor de água, e verificaram que a condutividade térmica depende do teor de água ou concentração de sólidos.

Sharma e Thompson (1973), em estudos realizados com grãos de sorgo, observaram uma relação linear crescente entre o teor de água a condutividade térmica.

Segundo Pabis, Jayas e Cenkowski (1998) a condutividade térmica de materiais de engenharia de sólidos (ex. aço, madeira, concreto) varia com a composição química, estrutura física, estado da substância, temperatura, e teor de umidade. Materiais biológicos não são homogêneos e variam na estrutura celular, composição, e teor de ar, portando a variação da condutividade térmica destes materiais é maior do que em materiais não biológicos.

Materiais agrícolas são armazenados, ventilados e secos em grande quantidade. A densidade total de tais produtos também influencia sua condutividade térmica, por exemplo, diferentes métodos de encher um silo, produz diferentes densidades totais. A condutividade térmica do ar que ocupa o espaço intergranular no grão em grande quantidade é relativamente pequena comparado com a do sólido para qualquer produto agrícola; a condutividade térmica em um leito profundo pode ser diferentes em diferentes locais por causa de mudança na densidade total. As mudança da densidade total pode ser causada secando ou variando o peso do grão em vários níveis.

A condutividade térmica da maioria dos biomateriais, incluindo grãos, variam com a temperatura. A condutividade térmica do trigo primavera vermelho duro é uma função linear do teor de umidade na faixa de temperatura testado -6 à 20°C, (Chandra e Muir, 1971). O efeito de temperatura em condutividade térmica é diferente para teores de umidade diferentes. Portanto,

(Chandra e Muir, 1971), escolheram a condutividade térmica média na faixa de teor de umidade entre 4,4 e 22,5% (b.u.) para representar este efeito.

Alagusundaram et al (1991), estudando os efeitos da temperatura e do teor de água em grãos de lentilha cevada e ervilha, observaram que a condutividade térmica aumentou com o aumento da temperatura e do teor de água dos grãos e concluíram que a equação linear foi a que melhor descreveu a relação entre a condutividade térmica, o teor de água e a temperatura.

Park, Alonso e Nunes (1999), utilizando o método em regime estacionário, verificaram que a condutividade térmica para o arroz em casca foi, em média,  $0,122 \text{ W.m}^{-1}\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1}$ , para um teor de água médio de 12,93% (b.u.), para o trigo, a média foi de  $0,138 \text{ W.m}^{-1}\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1}$ , para um teor de água médio de 11,74% (b.u.).

Afonso Júnior e Corrêa (2000), utilizando a condução de calor em regime transiente, por coordenadas cilíndricas, observaram que os valores da condutividade térmica do grão de café processado por via seca e úmida aumentaram com a elevação do teor de água, descrevendo uma relação quadrática. Notaram, também, que a condutividade térmica para o café descascado variou de 0,0934 a  $0,1735 \text{ W.m}^{-1}\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1}$ , para teores de água variando de 0,111 a 0,597 (b.s.). Já para o café em coco, este valor foi de 0,0843 a  $0,1415 \text{ W.m}^{-1}\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1}$ , para teores de água variando de 0,111 a 0,678 (b.s.); e para o café despulpado, este valor foi de 0,1033 a  $0,1762 \text{ W.m}^{-1}\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1}$ , para teores de água variando de 0,111 a 0,621 (b.s.).

Rossi e Roa (1980), determinando a condutividade térmica dos frutos de café, variedade desconhecida, com de teores de água de 11,8 e 59,1% (b.u.), obtiveram os valores de 0,0937 e  $0,1979 \text{ W.m}^{-1}\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1}$ , respectivamente.

Para Krupiczka, citado por Sasseron (1984), a pressão não exerce influência sobre a condutividade térmica dos materiais biológicos. Em muitos



alimentos o efeito da temperatura não é relevante. A condutividade é mais afetada pela estrutura celular.

Mohsenin (1980), Miles, Beck e Verkamp (1983) e Lamb (1976) têm mencionado equações que relacionam a condutividade térmica apenas com o teor de água e, para valores mais exatos, são relacionados com a composição química. Dois modelos têm sido propostos, denominados modelo paralelo e modelo perpendicular. Ambos baseiam-se em um sistema de dois componentes: sólido e água. A condutividade de vários componentes é dada por Miles, Beck e Verkamp (1983), os quais mencionam que a maior fonte de erro dessas aproximações é ignorar o ar no interior do alimento.

## **2.5 Difusividade térmica**

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

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

Segundo Mohsenin (1975), a difusividade térmica pode ser considerada como a taxa com que o calor é difundido para fora do material. Em termos físicos, a difusividade térmica dá uma medida de como a temperatura pode

variar quando um material é aquecido ou resfriado. Assim, essa propriedade é importante quando considera transferência de calor em regime transiente. Essa propriedade pode ser determinada indiretamente utilizando a relação entre a condutividade térmica, calor específico e densidade por meio da equação (11).

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p} \quad \text{Equação (11)}$$

em que:

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

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

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

$\rho$  : massa específica (kg).

Segundo Pabis, Jayas e Cenkowski (1998) a condução de calor transitória ou de estado não constante ocorre comumente durante o aquecimento ou resfriamento de produtos agrícolas. A taxa na qual o calor é difundido para fora ou para dentro da camada porosa de material agrícola depende da difusividade térmica do material. A partir da equação (11), pode ser concluído que uma relação linear entre a difusividade térmica e teor de umidade de um sólido não deve ser esperado. Isto também foi confirmado por (Kazarian e Hall, 1965) e podemos também concluir que a amplitude da difusividade térmica influencia a cinética de secagem. Usualmente, a difusividade térmica é calculada usando os valores experimentalmente medidos da condutividade térmica, calor específico, e massa específica do grão. Isto é conhecido como método indireto. Este método pode levar a resultados aproximados com um erro relativo que é difícil de estimar com relação ao valor verdadeiro real que pode somente ser determinado baseado em mensurações diretas.

Em termos físicos, a difusividade térmica dá uma medida de como a temperatura pode variar quando um material é aquecido ou resfriado. Nas determinações experimentais, a metodologia proposta por Dickerson (1965) tem

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

Telis (1992), utilizou o método proposto por Dickerson (1965) citado anteriormente para determinar a difusividade térmica de soluções de amido de milho e relata que, as condições necessárias são satisfeitas quando o termo geral  $\partial T/\partial t$ , na equação de transferência de calor, é constante. Baseando-se na geometria cilíndrica do aparelho, a equação de variação de energia é representada pela equação 12.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A = \alpha \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right\} \quad \text{Equação (12)}$$

se a transferência de calor é exclusivamente radial, a equação seguinte simplifica-se para:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A = \alpha \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right\} \quad \text{Equação (13)}$$

em que:

A : é igual a taxa constante de elevação de temperatura em todos os pontos do cilindro.

Considerando que o gradiente de temperatura  $\partial T/\partial t$  não é mais dependente do tempo, a equação (13) torna-se:

$$\frac{A}{\alpha} = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} \quad \text{Equação (14)}$$

Ao resolver essa equação para as condições de contorno:

Condições de contorno:

c.c.1  $T = A t = T_R$  em  $T > 0$  e  $r = R$ ;

c.c.2  $\partial T / \partial t = 0$  em  $t > 0$  e  $r = 0$ .

a solução é:

$$T_R - T = \frac{A}{4\alpha} (R^2 - r^2) \quad \text{Equação (15)}$$

tornando  $r = 0$ , temos:

$$\alpha = \frac{A R^2}{4(T_R - T_0)} \quad \text{Equação (16)}$$

em que:

$T_R$  : é a temperatura da superfície do cilindro;

$T_0$  : é a temperatura do centro. A equação 16 pode então ser usada para a determinação da difusividade térmica.

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

Afonso Júnior e Corrêa (2000), estudando a massa de grão de café, preparado por via seca e úmida, observaram que os valores da difusividade térmica, para o café descascado, variaram de  $1,357 \times 10^{-7}$  a  $1,699 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , para teores de água variando de 0,111 a 0,597 (b.s.). Para o café em coco, a

difusividade térmica variou de  $1,0694 \times 10^{-7}$  a  $1,5441 \times 10^{-7} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , para teores de água variando de 0,111 a 0,678 (b.s.), enquanto, para o café despulpado, a difusividade térmica teve uma variação de  $1,344 \times 10^{-7}$  a  $2,078 \times 10^{-7} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , para teores de água variando de 0,111 a 0,621 (b.s.). Os autores relatam, também, que não há diferenças acentuadas no comportamento das formas analisadas de preparo do café descascado contendo ou não a parte da mucilagem, o que pouco interfere nas propriedades termofísicas do produto.

Almeida (1979) constatou que a difusividade térmica de amêndoas de cacau, com 11 níveis de umidade, é função quadrática, tanto com o teor de água como com a massa específica aparente. Além disso, é determinada indiretamente, usando os valores experimentais da condutividade térmica, do calor específico e massa específica, como descrito pela equação (11).

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

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido na Universidade Federal de Lavras e no Laboratório de Propriedades Físicas e Avaliação de Qualidade de Produtos Agrícolas do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), situado na Universidade Federal de Viçosa – M.G. Foram avaliadas as seguintes propriedades termofísicas de cinco cultivares de café cereja descascado e nove níveis de umidade: calor específico, porosidade, condutividade térmica, massa específica e difusividade térmica.

#### 3.1 Colheita e preparo do café

No centro de cafeicultura da Universidade Federal de Lavras - UFLA cerca de 2.500 litros de café (*Coffea arabica L.*) de cinco cultivares (Acaia, Rubi, Catuai, Catucaí Amarelo e Catucaí Vermelho), com umidade média de 55% b.u., foram colhidos manualmente sobre pano. Após a colheita, o café de cada cultivar foi lavado e separado em café bóia, verde e cereja. A porção formada pelo café cereja foi descascada em um descascador mecânico, em seguida, acondicionada em sacos de polietileno trançado e colocada em terreiro de cimento para remoção do excesso de água. Amostras de cada cultivar foram retiradas para determinação do teor de água. Para evitar possíveis alterações no café em função do seu alto teor de água, todo o material foi mantido em câmara fria a 5°C.

Para se obterem os demais níveis de umidade, cerca de 15 kg de café úmido de cada cultivar foram colocados em estufa com ventilação forçada, com temperatura constante de 60°C. O peso final, correspondente para cada nível de umidade desejado, foi calculado a partir da seguinte equação:

$$P_f = P_i - (P_i \times P_Q) \quad \text{Equação (15)}$$

$$P_Q = \left\{ \left( \frac{U_i - U_f}{100 - U_f} \right) \right\} \times 100 \quad \text{Equação (16)}$$

em que:

Pf : peso final (kg);

Pi : peso inicial (kg);

PQ : porcentagem de quebra (%);

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

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

Após a secagem foram obtidos os seguintes níveis de umidade (%b.u.), utilizando o método padrão de estufa a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$ , durante 24 horas (Brasil, 1992).

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

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

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

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

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

### 3.2 Análises laboratoriais

A determinação das propriedades termofísicas foi realizada no Laboratório de Propriedades Físicas e Avaliação de Qualidade de Produtos Agrícolas do Centro Nacional e Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR). Todas estas análises foram determinadas com temperatura ambiente constante de  $20^\circ\text{C}$ .

#### 3.2.1 Determinação do teor de água (% b.u.)

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

### 3.2.2 Porosidade (%)

A porosidade da massa granular de café foi determinada utilizando um picnômetro de comparação a ar (Figura 1), em três repetições para cada nível de umidade das cinco variedades estudadas.

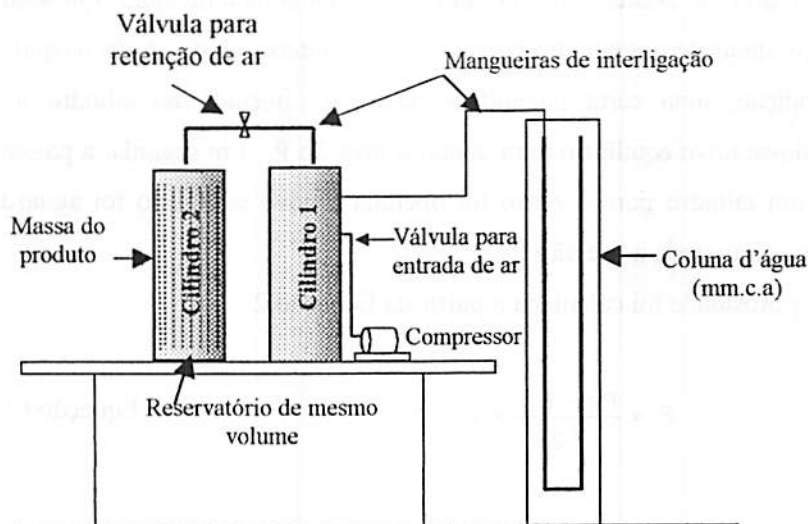


FIGURA 1 Picnômetro utilizado na determinação da Porosidade.

O picnômetro utilizado era constituído por dois cilindros com volume exatamente iguais. No cilindro n.º 1 foi conectada a uma válvula de retenção, por onde se injetava o ar proveniente de um compressor cuja pressão era controlada por manômetro. Este mesmo cilindro possuía uma segunda saída, que se interligava com uma coluna em forma de U, contendo água destilada com escala barométrica de 0 a 500 mm, em que foram realizadas as leituras das pressões  $P_1$  e  $P_2$ . O cilindro n.º 2 foi utilizado para receber a massa de grãos de café. Os dois cilindros eram interligados por meio de uma mangueira localizada na tampa perfurada, que garantia a passagem do ar e sua interrupção no momento desejado.



Para determinar a porosidade, o cilindro n.º 2 foi preenchido com o material e nivelado com uma régua. Para a operação de preenchimento, utilizou-se uma estrutura composta por um funil preso a um suporte de altura fixa, a fim de garantir um carregamento homogêneo do produto. Após a vedação dos cilindros, todo o ar existente foi retirado, zerando a coluna de água. Em seguida, a passagem de ar de um cilindro para o outro foi interrompida. Após o equilíbrio nesta condição, uma certa quantidade de ar foi injetada no cilindro n.º 1, aguardando-se novo equilíbrio para anotar a pressão  $P_1$ . Em seguida, a passagem de ar de um cilindro para o outro foi liberada e novo equilíbrio foi aguardado para então ser anotada a pressão  $P_2$ .

A porosidade foi calculada a partir da Equação 2.

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \times 100 \quad \text{Equação (2)}$$

em que:

$P$  : Porosidade (%);

$P_1$  e  $P_2$ : Pressão do ar (m.m.c.a).

O picnômetro foi calibrado com intuito de corrigir possíveis perdas de ar nas mangueiras de interligação. Para a calibração do picnômetro, foram utilizados volumes de água variando de 0 a 100%, com intervalos de 10 pontos percentuais. Através de uma equação de regressão com  $R^2 = 0,9998$  entre volume de água e porosidade observada (%), obteve-se a Equação 17 para a correção da porosidade calculada.

$$P_{cor} = 1,3264 * P + 0,105 \quad \text{Equação (17)}$$

em que:

$P_{cor}$  : Porosidade corrigida;

$P$  : Porosidade calculada a partir da Equação 2 em (%).

### 3.2.3 Massa específica aparente ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

Para a determinação da massa específica aparente do café cereja descascado, foi utilizado um dos cilindros do picnômetro (Figura 2), com volume igual a  $7,418 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ , anexado a uma estrutura com um funil preso a um suporte de altura fixa, para garantir um carregamento homogêneo da massa de grãos. O cilindro, inicialmente vazio e em seguida contendo amostras de café, foi pesado usando-se uma balança analítica de 0,01g de precisão, com três repetições para cada um dos nove níveis de umidade das cinco variedades estudadas.

A massa específica aparente foi calculada a partir da Equação 1.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Equação (1)}$$

em que:

$\rho$  : massa específica ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );

$m$  : massa do grão (kg);

$V$  : volume da massa do grão ( $\text{m}^3$ ).

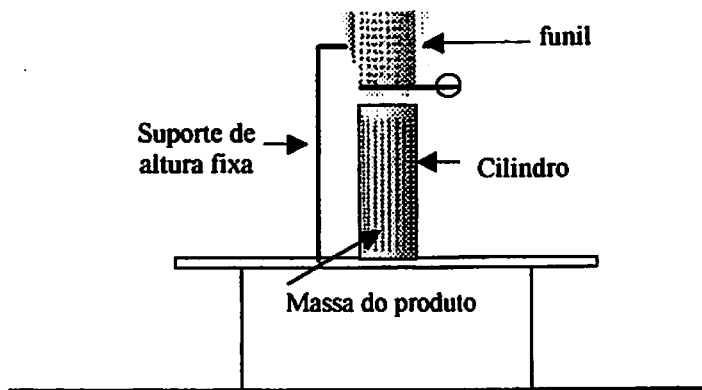


FIGURA 2 Equipamento utilizado na determinação da massa específica aparente.

### 3.2.4 Calor específico ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )

Foi utilizado um calorímetro de mistura direta para a determinação do calor específico da massa de grãos de café cereja descascado. O calorímetro era constituído de um cilindro de PVC contendo, no seu interior, uma garrafa térmica envolvida por lã de fibra de vidro para obter o máximo de isolamento possível com o exterior (Figura 3). Usou-se, para a determinação da temperatura no interior do calorímetro, um termômetro digital, cujo elemento sensível era um termistor (sonda térmica) adaptado na tampa de borracha do calorímetro e interligado ao termômetro por um termopar de Cobre-Constantan.

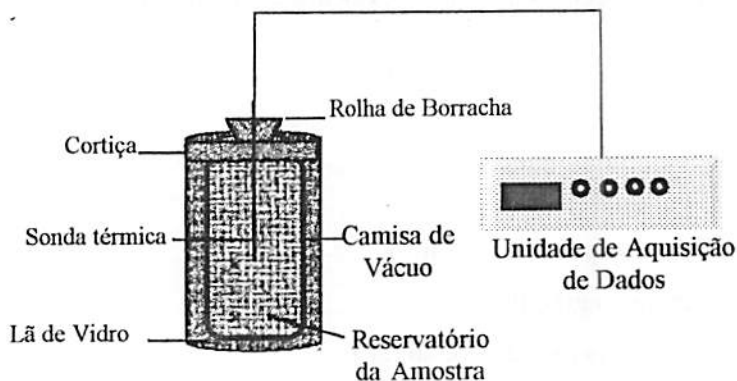


FIGURA 3 Calorímetro utilizado na determinação do calor específico.

O calor específico da massa do grão de café cereja descascado, para as diferentes variedades e teor de água, foi determinado pelo método das misturas, a pressão constante e temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$ , com três repetições para cada tratamento.

Neste método, o produto com massa e temperatura conhecidas foi colocado em um calorímetro de capacidade térmica conhecida, contendo água com temperatura e massa também conhecidas. Atendido o equilíbrio térmico, o calor específico do produto foi calculado.

### 3.2.4.1 Determinação da capacidade térmica do calorímetro

A determinação da capacidade térmica do calorímetro foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa, cerca de 100 g de água destilada ( $m_1$ ) foram colocadas no interior do calorímetro, a uma temperatura de aproximadamente de 70°C. Em seguida, o calorímetro foi agitado lentamente por aproximadamente 2 minutos, até obter-se a temperatura ( $T_1$ ).

Após o equilíbrio térmico, cerca de 100 g de água destilada ( $m_2$ ) foram adicionadas a uma temperatura em torno de 3°C ( $T_2$ ) dentro do calorímetro, agitando-se novamente o calorímetro por mais 2 minutos. Atingido o novo equilíbrio térmico, a temperatura ( $T_3$ ) foi medida. As temperaturas  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$  foram utilizadas para a determinação da capacidade calorífica do calorímetro ( $C_{cal}$ ), calculada por meio da Equação 18.

$$C_{cal} = \frac{[C_a \cdot m_2 \cdot (T_3 - T_2) - C_a \cdot m_1 \cdot (T_1 - T_3)]}{(T_1 - T_3)} \quad \text{Equação (18)}$$

em que:

$C_{cal}$  : Capacidade calorífica do calorímetro ( $\text{kJ} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$C_a$  : Calor específico da água ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$m_1$  : Massa da água quente (kg);

$m_2$  : Massa da água fria (kg);

$T_1$  : Temperatura da água quente ( $^\circ\text{C}$ );

$T_2$  : Temperatura da água fria ( $^\circ\text{C}$ );

$T_3$  : Temperatura de equilíbrio da água ( $^\circ\text{C}$ ).

### 3.2.4.2 Determinação do calor específico do produto

O calor específico do produto foi obtido para nove níveis de umidade, para cada variedade estudada, em 3 repetições, com amostras de aproximadamente 100 gramas. As amostras foram pesadas antes da determinação do calor específico e colocadas em temperatura ambiente de 20°C. O teste foi realizado em duas etapas. A primeira etapa foi idêntica à descrita no item 3.2.4.1. Na segunda etapa, cerca de 100 g de café com temperatura  $T_4$  foram misturados à água contida no calorímetro, agitando-se o calorímetro durante 2 minutos. Após ter-se atingido o novo equilíbrio térmico, mediu-se a temperatura ( $T_5$ ). O calor específico foi calculado segundo a equação:

$$C_p \cdot m_p \cdot (T_5 - T_4) = C_a \cdot (m_1 + m_2) \cdot (T_3 - T_5) + C_{cal} \cdot (T_3 - T_5) \quad \text{Equação (6)}$$

em que:

$C_p$  : Calor específico do produto ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$C_a$  : Calor específico da água ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$C_{cal}$  : Capacidade calorífica do calorímetro ( $\text{kJ} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$m_p$  : Massa de produto (kg);

$m_1$  : Massa da água quente (Kg);

$m_2$  : Massa da água fria (Kg);

$T_4$  : Temperatura do produto ( $^\circ\text{C}$ );

$T_3$  : Temperatura de equilíbrio da água ( $^\circ\text{C}$ );

$T_5$  : Temperatura de equilíbrio (água e produto)( $^\circ\text{C}$ ).

### 3.2.5 Condutividade Térmica ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ )

Para determinar a condutividade térmica da massa granular de café, utilizou-se um equipamento experimental baseado no método do cilindro teoricamente infinito e na hipótese de condução unidimensional, na direção radial, do calor gerado por um fio condutor.

O cilindro de alumínio utilizado no experimento apresentava 12 cm de diâmetro e 50 cm de altura (Figura 4), fechado em suas extremidades, sendo a extremidade superior removível para a colocação do material a ser analisado. No interior do cilindro havia uma resistência elétrica de cromo-níquel, protegida por uma camada de verniz, fixada em seu eixo geométrico para possibilitar a geração de calor. Pelo fio resistor fez-se passar uma corrente com baixa amperagem e voltagem, aproximadamente 1,05A e 2,9V, respectivamente, gerada por um regulador de tensão localizado no exterior do cilindro. Seis termopares de Cobre-Constantan foram dispostos radialmente no interior do cilindro e distantes um centímetro entre si. As extremidades dos termopares foram conectadas a um termômetro digital.

Antes da determinação da condutividade térmica, as amostras foram colocadas em bandejas e mantidas em uma câmara B.O.D., com temperatura controlada, na qual estava disposto o aparato do cilindro. As temperaturas foram monitoradas por meio de um termômetro digital para garantir o equilíbrio térmico entre o ambiente e o produto. Em seguida, preencheu-se o cilindro com o material a ser analisado até 2 cm da extremidade superior, para permitir a acomodação da tampa. Para essa operação, foi utilizada uma estrutura composta por um funil preso a um suporte de altura fixa, para garantir um carregamento homogêneo do produto para todos os testes realizados. Antes da geração de calor pela resistência elétrica, para cada repetição, as temperaturas da massa dos grãos foram anotadas em seis posições para verificação da homogeneidade da temperatura ao longo da massa no interior do cilindro. Após o equilíbrio da

temperatura, iniciou-se a geração de calor pela resistência elétrica. As temperaturas geradas no termopar de posição 1 foram anotadas durante 900 segundos, em intervalo de tempo de 30 segundos, controlados por um cronômetro digital. Após cada repetição, a fonte de energia foi mantida desligada durante um tempo em torno de 50 minutos obtendo, com isto, a homogeneização do sistema. O valor da potência dissipada pela fonte é tensão x corrente ( $V.I$ ) e o fluxo de calor,  $Q$ . Então considerou-se que  $V.I = Q$ .

A condutividade térmica da massa do grão de café foi obtida em regime transiente, por coordenadas cilíndricas, a partir da Equação 10.

$$K = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot (T_f - T_i)} \cdot \ln \left( \frac{\theta_2 - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} \right) \quad \text{Equação (10)}$$

em que:

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

$Q$  : potência dissipada pela fonte, por unidade de comprimento ( $W \cdot m^{-1}$ );

$T_f$  : temperatura final do intervalo usado para determinar a condutividade térmica ( $^\circ C$ );

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

$\theta_2$  : instante final do intervalo usado para determinar a condutividade térmica (s);

$\theta_1$  : instante inicial do intervalo usado para determinar a condutividade térmica (s);

$\theta_0$  : fator de correção de tempo (s).

Para a obtenção do fator de correção  $\theta_0$ , fez-se a regressão dos incrementos de temperatura, em função do logaritmo natural dos intervalos de tempo. O valor do termo de correção de tempo  $\theta_0$  foi determinado utilizando-se o arredondamento exponencial dos valores ( $e^{-a/b}$ ), obtidos a partir da equação de regressão para cada repetição da determinação da condutividade térmica, conforme descrito por Afonso Júnior e Corrêa (2000).

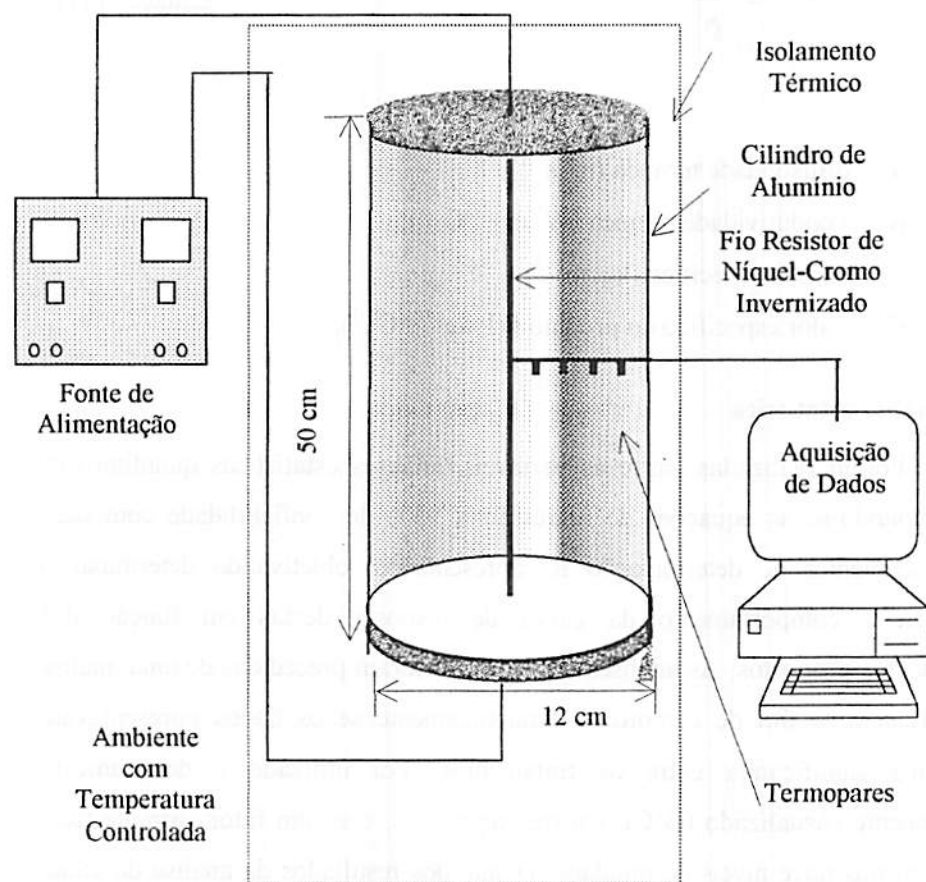


FIGURA 4 Aparato utilizado na determinação da condutividade térmica.



### 3.2.6 Difusividade térmica ( $m^2.s^{-1}$ )

A difusividade térmica foi determinada indiretamente usando os valores experimentais encontrados para o calor específico, condutividade térmica e massa específica aparente, a partir da Equação (11).

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p} \quad \text{Equação (11)}$$

em que:

$\alpha$  : difusividade térmica ( $m^2.s^{-1}$ );

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

$\rho$  : massa específica ( $kg.m^{-3}$ );

$C_p$  : calor específico do produto ( $kJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ ).

### 3.3 Análise estatística

Foram realizadas, entre as variáveis, análises estatísticas quantitativas, determinando-se as equações de regressão a 95% de confiabilidade com base nos coeficientes de determinação  $R^2$  apresentados, objetivando determinar a natureza e comportamento da curva de resposta destas em função dos tratamentos propostos. As análises de regressão foram precedidas de uma análise de variância, a fim de comprovar estatisticamente se os dados apresentavam diferença significativa entre os tratamentos. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC), em três repetições, com um fator variante (teor de água) nos nove níveis de umidade. Diante dos resultados da análise do efeito da variedade, para cada teor de água, dos dados experimentais e estimados, utilizou-se o teste de média Scott-Knott com intuito de verificar as diferenças significativas entre variedades e teor de água para cada determinação proposta neste trabalho, apresentado em anexos nas Tabelas de 7 a 11.

A análise de variância baseou-se no seguinte modelo estatístico:

$$Y_{ijk} = \mu + v_i + \tau_j + \delta_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

em que:

$y_{ijk}$  : observação tomada na  $i$ -ésima variedade,  $j$ -ésimo teor de água e  $k$ -ésima repetição;

$\mu$  : constante do modelo;

$v_i$  : efeito da  $i$ -ésima variedade;

$\tau_j$  : efeito da  $j$ -ésimo teor de água

$\delta_{ij}$  : efeito da interação da  $i$ -ésima variedade com  $j$ -ésimo teor de água;

$\varepsilon_{ijk}$  : erro experimental associado à observação  $y_{ijk}$  teor de água.

O modelo de regressão foi apresentado por :

$$\hat{y}_{ij} = a + bx_j + cx_j^2 + d_{ij}$$

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

em que:

$a, b, e c$  : coeficientes de regressão;

$d_{ij}$  : efeito do desvio de regressão;

$x_j$  :  $i$ -ésimo teor de água;

$\bar{y}_{ij}$  : média do  $j$ -ésimo teor de água.

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

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A literatura consultada apresenta diversas referências às propriedades termofísicas de produtos agrícolas. Valores de massa específica, porosidade, condutividade térmica, entre outras propriedades termofísicas, já foram determinados para o café por vários autores. Entretanto, resultados como os obtidos neste trabalho, demonstrando variações nas propriedades termofísicas para diferentes variedades de café cereja descascado em função do teor de água, ainda não haviam sido descritos. Esses resultados possuem grande importância na otimização de sistemas de secagem e nos trabalhos de simulação matemática. Além disso, em épocas de crise, como a atualmente vivida pelos cafeicultores, pequenas diferenças nos custos de secagem, por exemplo, podem definir se o processo será ou não economicamente viável.

### 4.1 Efeito das Variedades

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

Equações de regressão linear e quadrática foram ajustadas e o resumo da análise de variância para as variedades Catuai, Catucaí Vermelho, Catucaí Amarelo, Acaí e Rubi está apresentado nas Tabelas 2 a 6.

Observa-se que para todas as variedades e todas as propriedades termofísicas, tanto a regressão linear como a regressão quadrática ajustaram-se,

significativamente ( $P < 0,05$ ) aos dados encontrados. Considerando que tanto a equação linear como a quadrática são modelos simples e explicam satisfatoriamente as variações das propriedades termofísicas estudadas em função do teor de água, usou-se o critério de maior coeficiente de ajuste ( $R^2$ ) para a escolha da equação a ser adotada.

As equações ajustadas, bem como os valores observados e ajustados pelas equações, serão apresentados e discutidos separadamente para cada uma das propriedades termofísicas estudadas.

**TABELA 1** Resumo da análise de variância da massa específica aparente, porosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica para cinco variedades de café cereja descascado e nove teores de água.

Causa de variação	G. L.	Quadrado médio				
		Massa específica	Porosidade	Calor específico	Condutividade térmica	Difusividade térmica
Variedade	4	884,039395*	16,052690*	0,314293*	0,000250*	0,006039*
Teor de água	8	12127,302504*	209,459951*	1,126627 *	0,001925*	0,008034*
Variedade x Teor de água	32	884,039395*	16,052690*	0,314293*	0,000250*	0,006037*
Resíduo	90	10,768483	5,281754	0,011267	0,000037	0,000170
C. V. (%)		0,70	1,77	5,88	4,50	7,47
Média geral		468,214442	62,6388370	1,8043037	0,1348896	0,1744489

\* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

**TABELA 2** Resumo da análise de variância da regressão da massa específica aparente, porosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica para a variedade Catuaí

Causa de variação	G. L.	Quadrado médio				
		Massa específica	Porosidade	Calor específico	Condutividade térmica	Difusividade térmica
Regressão linear	1	93506,065411 *	1051,266286*	9,430020*	0,019000*	0,048319*
Regressão quadrática	1	591,010532*	34,831860*	0,294090*	0,000636*	0,022958*
Desvio	6	439,806564*	13,375867*	0,034373*	0,000166*	0,001477*
Resíduo	90	10,768483	5,281754	0,011267	0,000037	0,000170

\* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

45

**TABELA 3** Resumo da análise de variância da regressão da massa específica aparente, porosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica para a variedade Catuaí Vermelho

Causa de variação	G. L.	Quadrado médio				
		Massa específica	Porosidade	Calor específico	Condutividade térmica	Difusividade térmica
Regressão linear	1	111097,954558*	1314,072182*	9,560730*	0,007442*	0,057154*
Regressão quadrática	1	5841,175079*	63,181854*	0,090322*	0,002694*	0,018775*
Desvio	6	1251,002994*	25,880577*	0,039589*	0,000084*	0,000810*
Resíduo	90	10,768483	5,281754	0,011267	0,000037	0,000170

\* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

**TABELA 4** Resumo da análise de variância da regressão da massa específica aparente, porosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica para a variedade Catucaí Amarelo.

Causa de variação	G. L.	Quadrado médio				
		Massa específica	Porosidade	Calor específico	Condutividade térmica	Difusividade térmica
Regressão linear	1	113563,288488*	1818,058257*	8,670464*	0,019215*	0,046555*
Regressão quadrática	1	5516,850091*	144,789897*	1,231355 *	0,000362*	0,028190*
Desvio	6	729,952797*	15,046592*	0,123104*	0,000132*	0,001022*
Resíduo	90	10,768483	5,281754	0,011267	0,000037	0,000170

\* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

46

**TABELA 5** Resumo da análise de variância da regressão da massa específica aparente, porosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica para a variedade Acaíá.

Causa de variação	G. L.	Quadrado médio				
		Massa específica	Porosidade	Calor específico	Condutividade térmica	Difusividade térmica
Regressão linear	1	92340,452571*	1664,645189*	6,846016*	0,010389*	0,039277*
Regressão quadrática	1	3274,972071*	67,761375*	0,556054*	0,001911*	0,019218*
Desvio	6	943,261675*	16,430099*	0,019069*	0,000031*	0,000250*
Resíduo	90	10,768483	5,281754	0,011267	0,000037	0,000170

\* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

**TABELA 6** Resumo da análise de variância da regressão da massa específica aparente, porosidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica para a variedade Rubi.

Causa de variação	G. L.	Quadrado médio				
		Massa específica	Porosidade	Calor específico	Condutividade térmica	Difusividade térmica
Regressão linear	1	81378,615086*	2212,989730*	9,972448*	0,011976*	0,019834*
Regressão quadrática	1	242,895285*	293,398451*	0,014372*	0,006481*	0,004770*
Desvio	6	421,288205*	10,438867*	0,058624*	0,000131*	0,004770*
Resíduo	90	10,768483	5,281754	0,011267	0,000037	0,000170

\* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.



## 4.2 Propriedades termofísicas

### 4.2.1 Massa específica aparente

Nas Figuras 5, 6 e 7 são apresentados os resultados obtidos e as equações ajustadas para massa específica aparente das variedades estudadas, em função do teor de água. Observa-se que o valor da massa específica do café cereja descascado aumentou com o aumento do teor de água do produto em todos os intervalos testados, e a equação quadrática foi a que melhor se ajustou aos dados observados. Relações quadráticas foram igualmente encontradas por Afonso Júnior e Corrêa (2000) para o café descascado, em coco e despulpado, para a variedade Catuai Vermelho, e por Couto et al (1999) para grãos de café das variedades Catuai e Timor, em dois estádios de maturação.

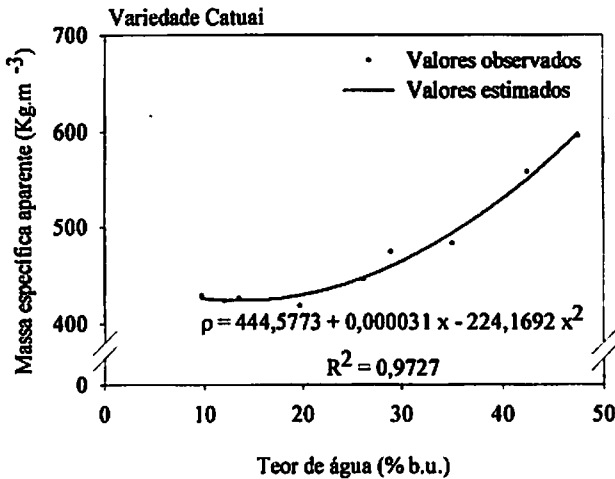
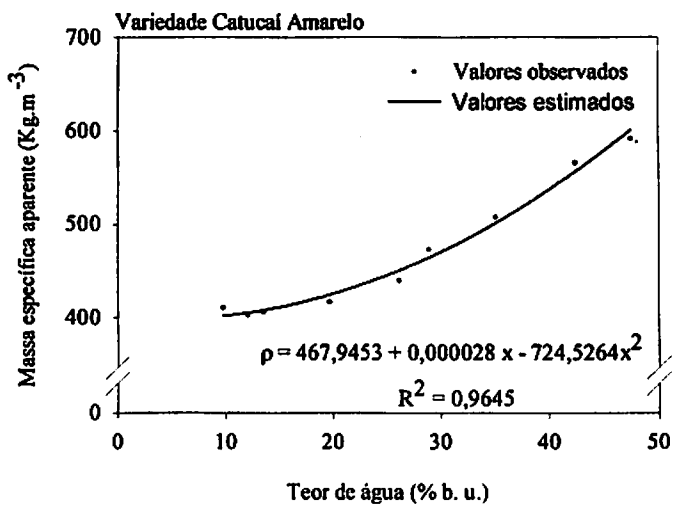
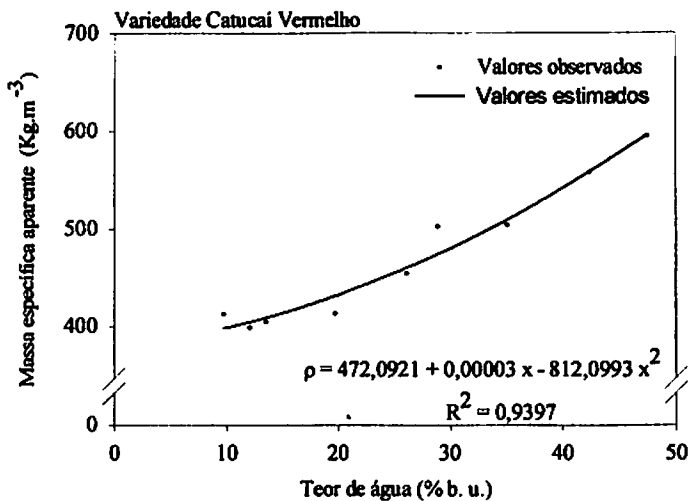


FIGURA 5 Gráfico da massa específica aparente do café cereja descascado da variedade Catuai.



**FIGURA 6** Gráfico da massa específica aparente do café cereja descascado das variedades Catucaí Vermelho e Catucaí Amarelo.

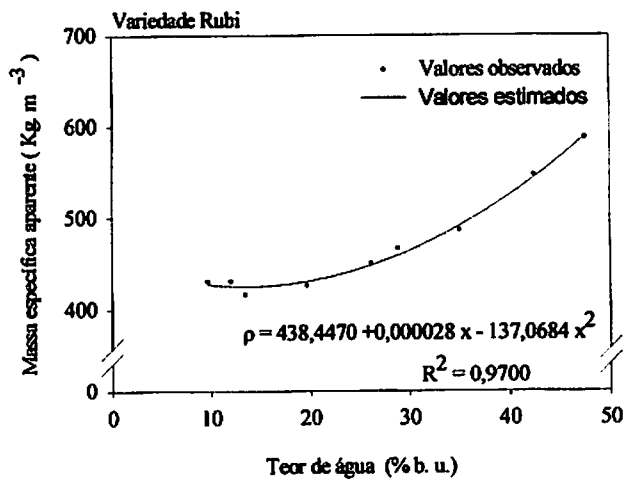
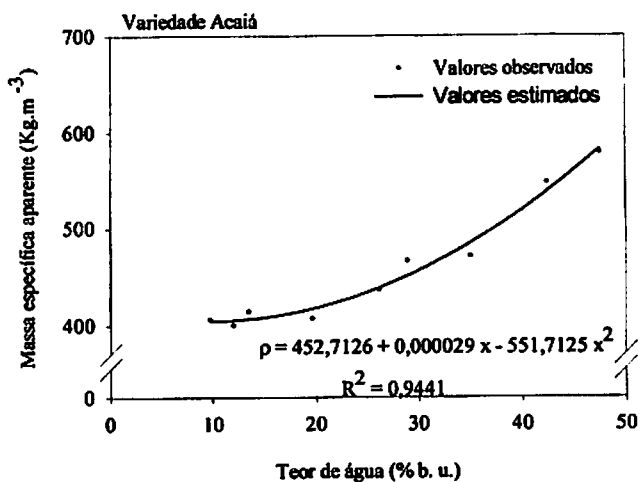


FIGURA 7 Gráfico da massa específica aparente do café cereja descascado das variedades Acaia e Rubi.

É importante ressaltar que, ao contrário do que ocorre com a maioria dos grãos, a massa específica aparente do café cereja descascado aumentou para os níveis mais elevados do teor de água.

A massa específica aparente é uma relação entre a massa do produto e o volume ocupado pelo mesmo, considerando os espaços vazios. Nos grãos, o aumento do teor de água resulta num aumento na massa dos grãos sendo, porém, acompanhado de um aumento mais que proporcional no volume dos grãos, resultando na redução da massa específica aparente. O mesmo não acontece com o café cereja descascado em razão da presença do pergaminho que impede grandes variações no seu volume. Desta forma, o aumento do teor de água dos grãos resulta num aumento no valor da massa do produto sem, no entanto, ocorrem variações no volume dos mesmos, resultando num aumento da massa específica aparente.

#### **4.2.2 Porosidade**

Os valores de porosidade do café cereja descascado observados e estimados pelas equações ajustadas para as variedades estudadas neste trabalho são apresentados nas Figuras 8, 9 e 10. Observa-se que a porosidade aumenta com a redução do teor de água da massa de grãos de café cereja descascado, e o modelo quadrático foi o que apresentou o melhor coeficiente de ajuste ( $R^2$ ) para todas as variedades.

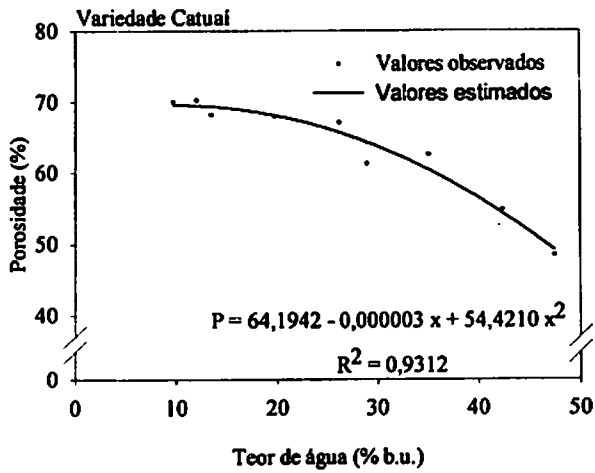
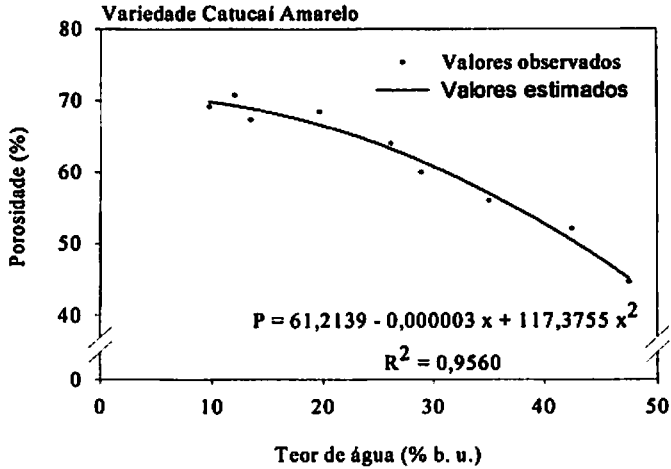
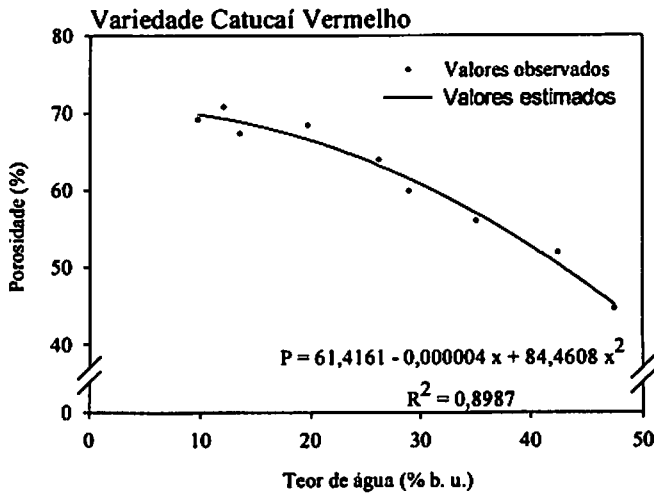


FIGURA 8 Gráfico da porosidade do café cereja descascado da variedade Catuai.



**FIGURA 9** Gráfico da porosidade do café cereja descascado das variedades Catucaí Vermelho e Catucaí Amarelo

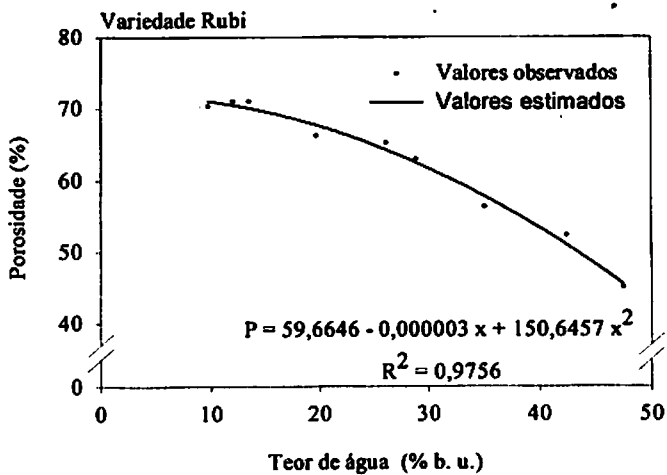
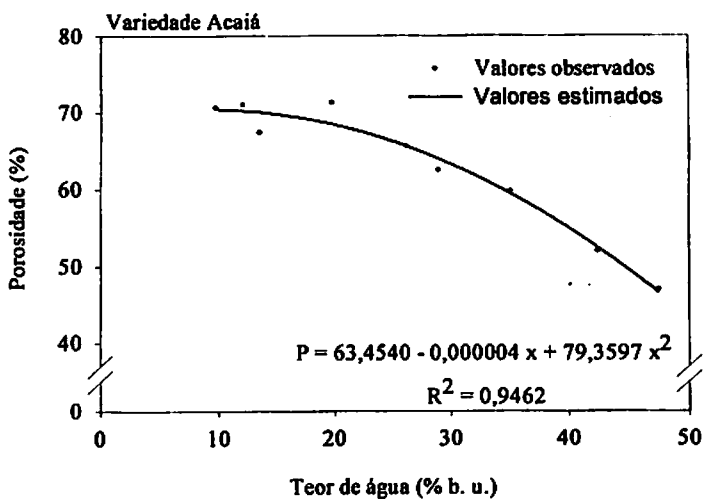


FIGURA 10 Gráfico da porosidade do café cereja descascado das variedades Acaia e Rubi.

Este comportamento é igualmente descrito por Chandrasekar e Viswanathan (1999) em frutos de café descascado da espécie robusta e arábica.

Como pode ser observado na Figura 11, o fruto de café é composto de casca, mucilagem, pergaminho e semente.

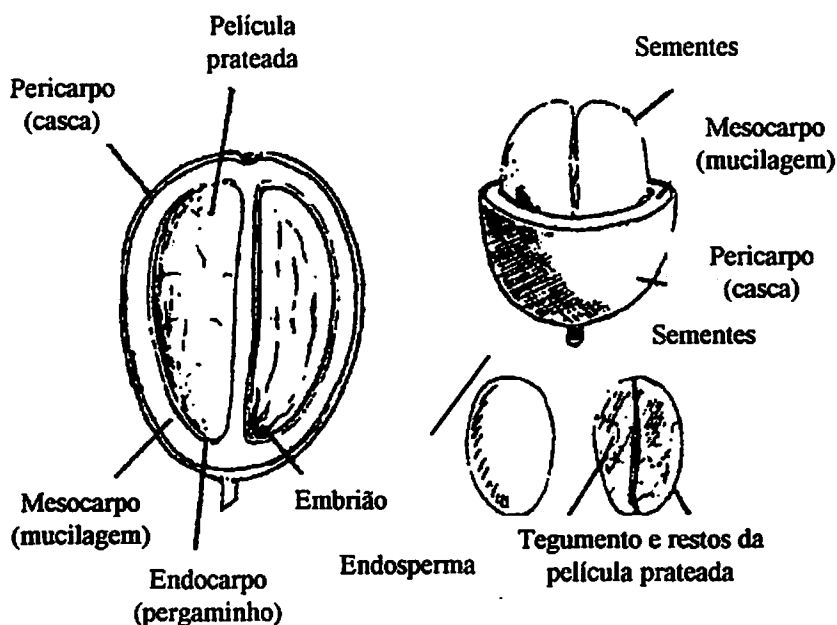


FIGURA 11 Corte longitudinal e transversal do fruto de café cereja.

No café cereja descascado permanecem a semente, o pergaminho e parte da mucilagem. Na semente, como nos demais grãos agrícolas, observa-se redução do seu volume com a redução do teor de água. O pergaminho, no entanto, deve apresentar pequenas variações no seu tamanho em razão de sua estrutura mais rígida conferida pela composição rica em lignina e celulose. Desta maneira, quando o teor de água do café cereja descascado reduz, o volume da semente também reduz, não ocorrendo, no entanto, o mesmo com o pergaminho. Assim, os espaços vazios da massa de café cereja descascado provavelmente têm pouca variação, mas ocorre um aumento nos espaços vazios entre a semente e o pergaminho. O equipamento usado para determinar a porosidade não permite



avaliar somente o volume dos espaços vazios entre os grãos, pois emprega ar e este fluido possui capacidade de penetrar entre o pergaminho e a semente, explicando, assim, o aumento observado na porosidade com a redução do teor de água do café cereja descascado.

#### **4.2.3 Calor específico**

Os valores observados e estimados do calor específico, bem como as equações ajustadas, são apresentados nas Figuras 12,13 e 14. Observa-se que o calor específico aumentou com o aumento do teor de água para todas as variedades estudadas e que a equação quadrática foi a que melhor se ajustou aos dados observados, confirmando os resultados relatados por Afonso Júnior e Corrêa (2000) nos estudos envolvendo a variedade Catuai Vermelho.

O calor específico para diversos grãos agrícolas tem sido descrito como uma função linear do teor de água. No entanto, relações quadráticas, como as encontradas neste trabalho, têm sido descritas na literatura tanto para café como para outros produtos agrícolas.

Observa-se que apesar de todos os valores encontrados situarem-se entre 1,00 e 3,00  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  e apresentarem variações semelhantes entre as cultivares, é importante ressaltar que não foi possível ajustar uma única equação para todas as variedades, conforme já foi discutido no item 4.1. Desta forma, modelos teóricos de predição da variação da temperatura do café cereja descascado no armazenamento ou durante a secagem devem levar em consideração a cultivar do café.

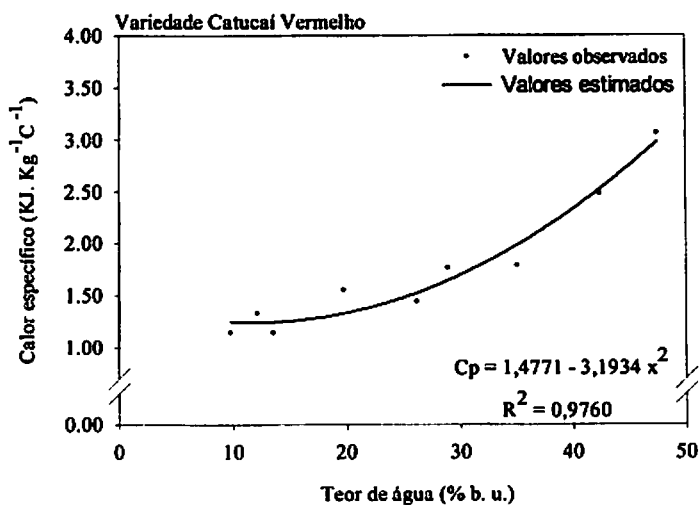
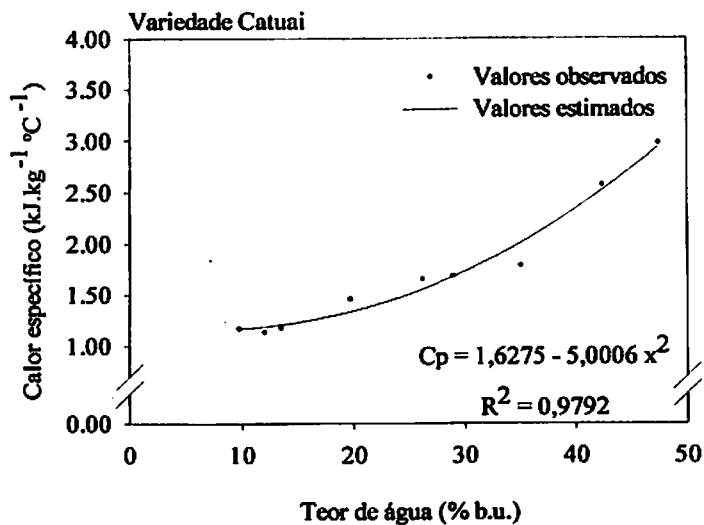
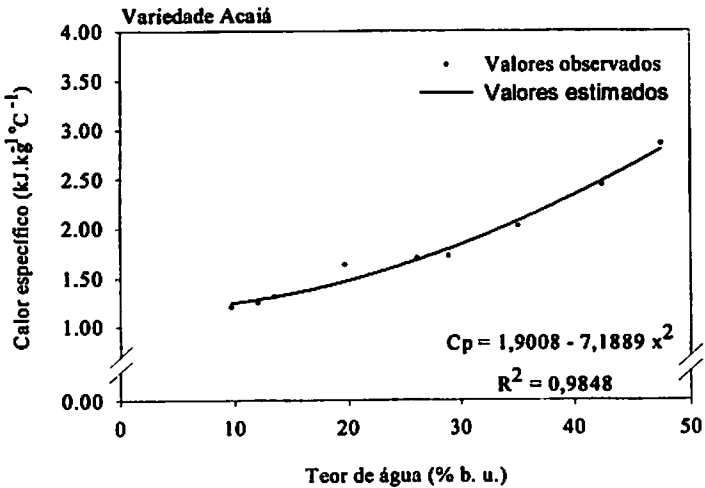
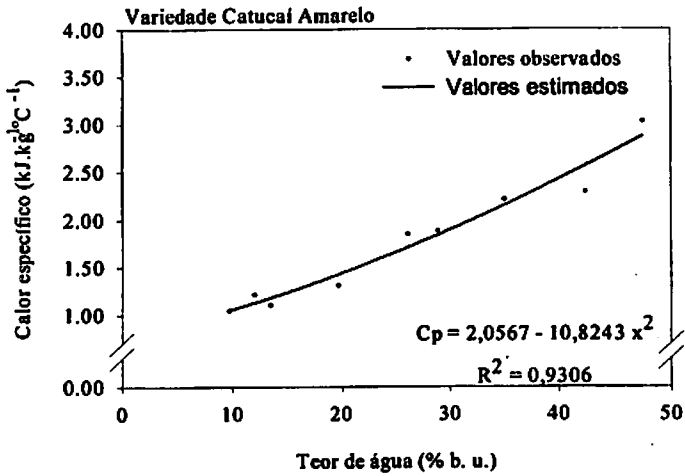


FIGURA 12 Gráfico do calor específico do café cereja descascado das variedades Catuai e Catucaí Vermelho



**FIGURA 13** Gráfico do calor específico do café cereja descascado das variedades Catucaí Amarelo e Acaíá

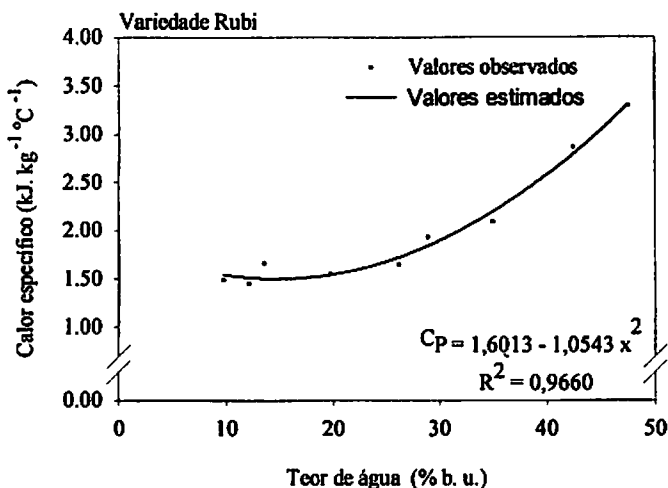


FIGURA 14 Gráfico do calor específico do café cereja descascado da variedade Rubi.

#### 4.2.4 Condutividade térmica

Os valores observados da condutividade térmica, bem como os valores estimados pela equação ajustada em função do teor de água das variedades estudadas, são apresentados nas Figuras 15, 16 e 17. Observa-se que os valores da condutividade térmica aumentaram com o aumento do teor de água da massa de grãos de café cereja descascado e a equação quadrática foi a que melhor se ajustou aos dados observados.

Apesar dos valores da condutividade térmica terem variado dentro da faixa de 0,10 a 0,20 W m<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup> para todas as variedades estudadas, a relação desses valores com o teor de água foi diferente para cada uma das variedades

térmica de materiais agrícolas podem ser alterados pela estrutura celular, massa específica e porosidade. Conforme visto anteriormente, os valores dessas propriedades físicas variam significativamente ( $P < 0,05$ ) entre as variedades estudadas. Diversos autores têm descrito relações quadráticas e lineares para a condutividade térmica em função do teor de água para diversos produtos agrícolas e valores na mesma ordem de grandeza dos dados observados neste trabalho (Afonso Júnior e Corrêa, 2000; Chandrasekar e Viswanathan, 1999; Pabis, Jayas e Cenkowski, 1998; Alagusundaran et al, 1991; Sasseron, 1984; Park, Alonso e Nunes, 1982; Passos, Fortes e Mello, 1982; Fortes e Okos, 1980; Rossi e Roa, 1980; Almeida, 1979; Sharma e Thompson, 1973; Kazarian e Hall, 1965).

Conforme relatado por Maroulis, Shah e Saravacos (1991) e Stolf (1972), a transferência de energia na forma de calor numa massa de grãos ocorre por condução e convecção. É um fenômeno de extrema complexidade devido à fração de espaços vazios presentes na massa granular. O aumento da condutividade térmica com o aumento do teor de água observado neste trabalho pode estar relacionado à redução da porosidade da massa granular do café, favorecendo o fenômeno de condução de calor.

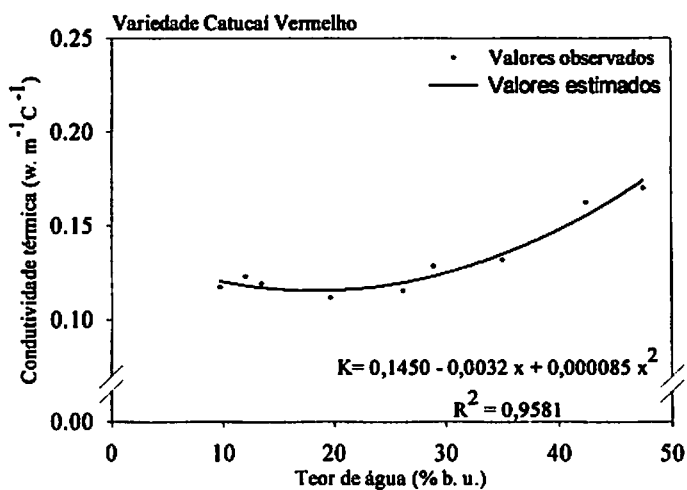
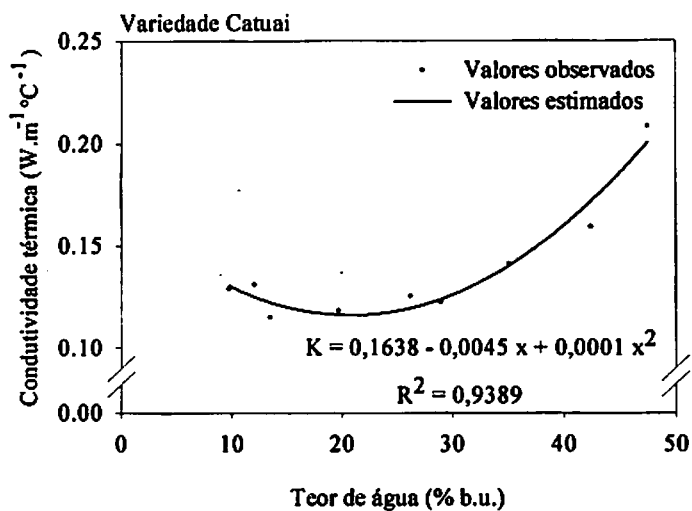


FIGURA 15 Gráfico da condutividade térmica das variedades Catuai e Catucaí Vermelho.

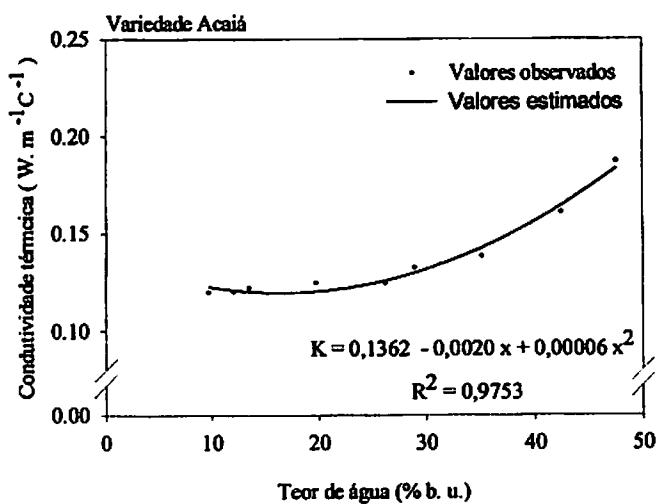
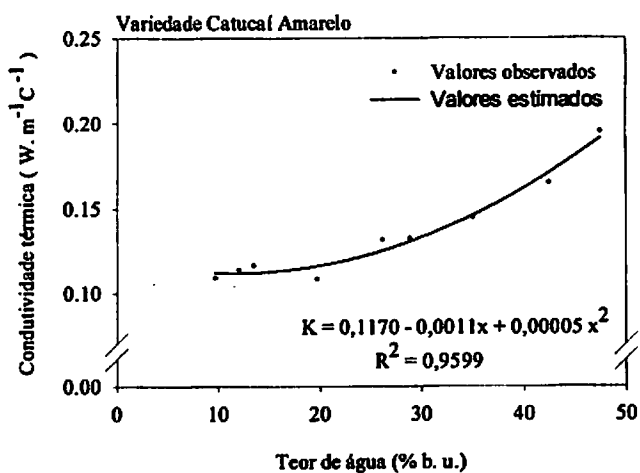


FIGURA 16 Gráfico da conduktividade térmica das variedades Catucaí Amarelo e Acaia.

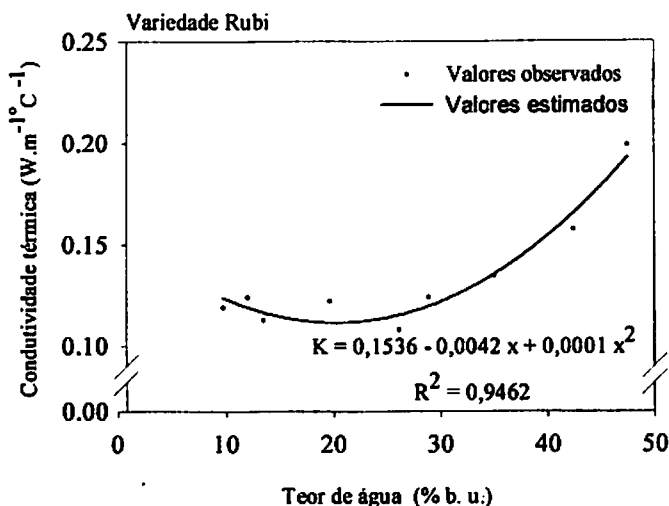


FIGURA 17 Gráfico da condutividade térmica da variedade Rubi.

#### 4.2.5 Difusividade térmica

Os valores calculados para a difusividade térmica a partir dos dados observados, bem como os valores estimados pelas equações ajustadas, são apresentados nas Figuras 18, 19 e 20. Observa-se que a difusividade térmica reduziu com o aumento do teor de água e a equação quadráticas foi a que melhor se ajustou aos dados calculados.

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



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

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

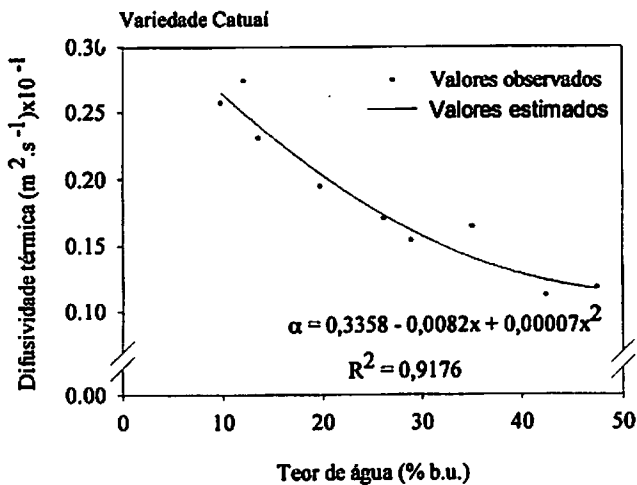


FIGURA 18 Gráfico da difusividade térmica da variedade Catuai.

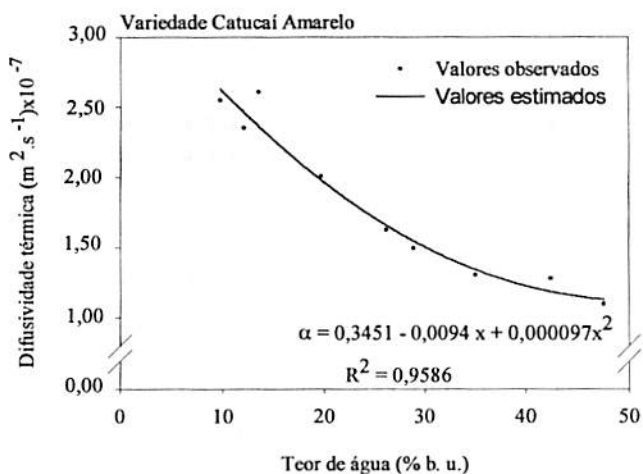
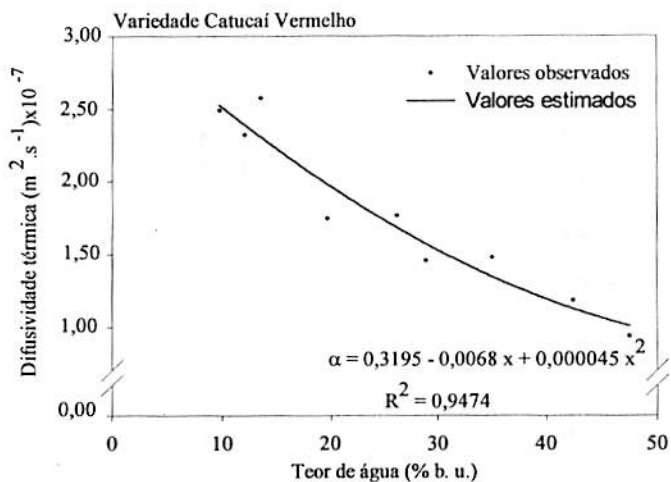


FIGURA 19 Gráfico da difusividade térmica das variedades Catucaí Vermelho e Catucaí Amarelo.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C. Propriedades térmicas dos grãos de café. SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1.,2000, Poços de Caldas, MG. Resumos expandidos... Brasília; Embrapa Café e MINASPLAN 2000. v.2, p. 1142-1146.
- ALAGUSUNDARAM, K.; JAYAS, D.S.; MUIR, W.E., WHITE, N.D.G. Thermal conductivity of bulk barley, lentils and peas. American Society of Agricultural Engineers, Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan v.34 n.4 p.1784-1788, July-Aug. 1991.
- ALMEIDA, B.V. Determinação das propriedades físicas de amêndoas de cacau. Viçosa: UFV, 1979. 70p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Agrícola).
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma agrária, Regras para análise de sementes (RAS), Brasília, 1992. 365p.
- BILANSKI, W.K.; FISHER, D.R. Thermal conductivity of rapeseed. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, v.19, n.4, p.788-791, 1976.
- BROWNE, D. A. Variation of the bulk density of cereals with moisture content. Journal of Agricultural Engineering Research. Silsoe, v.7, n.4, p.288- 290, 1962.
- CHANDRA, S.; MUIR, W.E. Thermal conductivity of spring wheat at low temperatures. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, v.14, n.4, p.644-646, 1971.
- CHANDRASEKAR, V.; VISWANATHAN, R. Physical and thermal properties of coffee. Journal Agricultural Engineering, New Delhi, n.73, p.227-234, feb. 1999.
- CHANG, C.S. Thermal conductivity of wheat, corn, and grain sorghum as affected by bulk density and moisture content. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.29, n.5, p.1447-1450, 1986.

- CHUNG, D.S.; CONVERSE, H.H. Effect of moisture content on some physical properties of grains. *Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan*, v.14 n.4, p.612-614, 1969.
- CORRÊA, P.C.; MOURE, J. Higroscopicidad y propiedades térmicas de semillas de sorgo. *Alimentación Equipos y Tecnología, Madri*, v.29, n.1, p.149-153, 2000.
- CORRÊA, P.C.; SAMPAIO, C.P.; REGAZZIA.J.; AFONSO JÚNIOR, P.C. Calor específico dos frutos do café de diferentes cultivares em função do teor de umidade. *Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa*, n.1, p.18-22, 2000. Especial
- COUTO, S.M.; MAGALHÃES, A.C.; QUEIROZ, D.M.; BASTOS, I.T. Massa específica aparente e real e porosidade de grãos de café em função do teor de umidade. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande*, v.3, n.1, p.61-68, 1999.
- DAY, C. LeRoy. A device for measuring voids in porous materials. *Agricultural Engineering, Missouri, Columbia*, v.45, n1, p.36-37, 1964.
- DE VRIES, D.A. A no stationary method for determining thermal conductivity of soil in situ. *Landbou - Whogeschool, Holland*, v.73, n.2, p.83-89, 1952.
- DICKERSON, JR, R.W. An Apparatus for the Measurement of Thermal Diffusivity of Foods, *Food technology, Chicago*, v.19, p.880-886, may 1965.
- DISNEY, R.W. The specific heat of some cereal grains. *Cereal Chemistry, Slough, Bucks, England*, v.31, n.3, p.229-239, 1954.
- DROUZAS, A.E.; SARAVACOS, G.D. Effective thermal conductivity of granular starch materials. *Journal of Food Science, Chicago*, v.53, n.6, p.1795-1799, 1988.
- DIAS, M.C.L. de L.; BARROS, A.S. do R. Avaliação de métodos para remoção da mucilagem de sementes de café (*Coffea arabica* L.). *Revista Brasileira de Sementes, Brasília*, v.15, n.2, p.191-195, 1993.
- FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA UFSCar, 45, 2000, São Carlos. Anais..., São Carlos: UFScar, 2000, p.255-258.

- FORTES, M.; OKOS, M.R.** Changes in physical properties of corn during drying. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, v.23, n.4, p.1004-1008, 1980.
- GUSTAFSON, R.J.; HALL, G.E.** Density and porosity changes of shelled corn during drying. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.15, n.1, p.523-525, 1972.
- HWANG, M.P.; HAYAKAWA, KAN-ICHI.** A specific heat calorimeter for foods. *Journal of food science*. Chicago, v.44, n.2, p.435-438, 1979.
- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P.** Fundamentos de transferência de calor e de massa. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 1992. 380p.
- JAYAS, D.S.; SOKHANSANI, S.; WHITE, N.D.G.** Bulk density and porosity of two canola species. American Society of Agricultural Engineers, *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.32, n.1, p.291-294, 1989.
- KAZARIAN, E.A.; HALL, C.W.** Thermal properties of grain. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.8, n.1, p.33-38, 1965.
- LAMB, J.** Influence of water on the thermal properties of foods. *Chemistry and Industry*, v. 24, p.1046-1048, 1976.
- LENTZ, C.P.** Thermal conductivity of meats, fats, gelatin gels, and ice. *Food technology*. Washington, v.15 n.5, p.243-247, may 1961.
- LOPES FILHO, J.F.** Propriedades térmicas e características de secagem de batata. Viçosa: UFV, 1983. 48p. (Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos).
- MAROULIS, Z.B.; SHAH, K.K.; SARAVACOS, G.D.** Thermal conductivity of gelatinized starches. *Journal of Food Science*, Chicago, v.56, n.3, p.773-776, 1991.
- MATTOS, F.R.; MARTINS, O.** Propriedades térmicas de alimentos. Departamento de Engenharia Agrícola. Viçosa: UFV, 1998. "Manuscrito".
- MILES, C.A.; BECK, G.V.; VEERKAMP, C.H.** Calculation of thermo physical properties of foods. In: JOWITT, R.; ESCHER, F.; HALLSTROM, B.; MEFFERT, H.F.; SPIESS, W.E.L.; VOS, G. (eds.). "physical Properties of Foods", New York: Applied Science Publisher, 1983. 281p.

- MOHSENIN, N.N. Physical properties of plant and animal materials.** New York, Gordon and Breach, 1972. 734 p.
- MOHSENIN, N.N. Thermal properties of foods and agricultural materials.** ( Part I: Basic concepts and specific heat). Department of Agricultural Engineering. The Pennsylvania State University, 1975. 160 p.
- MOHSENIN, N.N. Thermal properties of foods and agricultural materials.** New York: Gordon and Breach science publishers Inc., 1980. 407p.
- MOREIRA, S.M.C.; CHAVES, M.A.; OLIVEIRA, L.M.** Comparação da eficiência de líquidos na determinação da massa específica aparente de grãos agrícolas. *Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa*, v.9, n.1- 2, p.22-24, 1985.
- MORITA, T.; SINGH, R.P.** Physical and thermal properties of short-grain rough rice. *Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan*, v.22 n.3, p.630 636. 1979.
- MUIR, W.E.; CHANDRA, S.** Thermal conductivity of spring wheat at low temperatures. *Transactions of the ASAE, St. Joseph, Paper n.70*, p.805, 1970. Paper.
- MUIR, W.E.; VIRAVANICHAJ, S.** Specific heat of wheat. *Journal of Agricultural Engineering Research. Wrest Park, Silsol, Gedford*, v.17, p.338-342, 1972.
- PABIS, S.; JAYAS, D.S.; CENKOWSKI,** Grain drying: theory and practice. New York: John Wiley & Sons; Inc. 1998. 303p.
- PARK, K.J.; ALONSO, L.F.T.; NUNES, A.S.** Determinação experimental da condutividade e difusividade térmica de grãos em regime permanente. *Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas*, v.19, n.2, p.264-269, 1999.
- PARKER, R.E.; FRIESEN, J.A.** Thermal properties of seed cotton. *Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan*, 1968. Paper n.68-301.
- PASSOS, E.F.; FORTES, M.; MELLO, J.C.** Condutividade térmica da pasta de mandioca. *Revista Ceres*. v.29n.162, p.222-231. 1982.

PAULI, R.U.; MAUAD, F.C.; HEILMANN, H.P. Física 2: calor e termodinâmica. São Paulo: Pedagógica e Universitária, 1978. v.2, 242p.

PIETROBON, C. L. R.; PEREIRA, N.C. & FREIRE, J. T. Determinação da condutividade térmica I – análise experimental. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTOS EM MEIOS POROSOS, 15, Uberlândia 1987. Anais... Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia, 1988. p.150-161

PINHEIRO, G.S. Efeito de embebição em sal (NaCl) na taxa e depressão do ponto de congelamento e qualidade de carne bovina. Lavras: UFLA. 1998. 78p. (Dissertação de Mestrado em Ciência dos Alimentos).

PRADO, E.P. Secagem de sementes de cacau em camadas finas, a sessenta e oitenta graus celsius e variação da porosidade durante o processamento. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 1978. 31p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola).

REIDY, G.; RIPEEN, A.L. Methods for determining thermal conductivity in foods. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, v.14 n.2, p.248-254, 1971.

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

ROSSI, S.J.; FIOREZE, R.; OLIVEIRA, A.M.C.; MALZAC, H.F. Propriedades térmicas de castanha de caju e raspa de mandioca. Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, v.7, n.1, p.51-56, 1982.

SASSERON, J.L. Avaliação de propriedades físicas e curvas de secagem, em camadas finas, de amêndoas de cacau (*Theobroma cacao* L.). Viçosa: UFV, 1984. 61p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola).

→ SHARMA, D.K.; THOMPSON, T.L. The specific heat and thermal conductivity of grain sorghum. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Michigan, v.16 n.1, p.114-117, 1973.

STOLF, S.R. Medição da condutividade térmica dos alimentos. Boletim do ITAL, Campinas, n.30, p.67-80, 1972.

**SWEAT, V.E.; HAUGH, C.G.** A thermal conductivity probe for small food samples. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v.17 n.1, p.56-58, 1974.

**TELIS, J.R.** Hidrodinâmica e transferência de calor do escoamento laminar de fluidos não-newtonianos em tubos. Campinas: UNICAMP, 1992. 125p. (Dissertação de Doutorado em Engenharia de Alimentos).

**VIEIRA, J.A.G.** Característica de secagem e avaliação das propriedades físicas da batata doce. Lavras: UFLA, 1991. 77p. (Dissertação de Mestrado em Ciência dos Alimentos).

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

**WRIGHT, M.E.; PORTERFIELD, J.G.** Specific heat of Spanish peanut. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v.13 n.4, p.508-510, 1970.



## 7 ANEXOS

<b>ANEXO A</b>		<b>Página</b>
<b>TABELA 1 A</b>	<b>Resumo do teste de média da composição dos valores experimentais médios da variável Massa específica aparente analisada.....</b>	<b>75</b>
<b>TABELA 2 A</b>	<b>Resumo do teste de média da composição dos valores experimentais médios da variável Porosidade analisada.....</b>	<b>76</b>
<b>TABELA 3 A</b>	<b>Resumo do teste de média da composição dos valores experimentais médios da variável Calor específico analisada.....</b>	<b>77</b>
<b>TABELA 4 A</b>	<b>Resumo do teste de média da composição dos valores experimentais médios da variável Condutividade térmica analisada.....</b>	<b>78</b>
<b>TABELA 5 A</b>	<b>Resumo do teste de média da composição dos valores experimentais médios da variável Massa específica aparente analisada.....</b>	<b>79</b>

**FIGURA 1A - Resumo do teste de média da composição dos valores experimentais médios da variável Massa específica aparente analisada.**

Massa específica aparente ( Kg. m <sup>-3</sup> )									
Variedades	Níveis de umidade (% b.u.)								
	9,72	12,03	13,49	19,68	26,15	28,90	35,06	42,43	47,51
Catuai	429,11 b	423,55 b	426,53 c	418,68 c	445,99 b	474,34 b	482,99 b	557,45 b	594,66 c
Catucaí Vermelho	412,20 a	398,62 a	404,09 a	413,08 b	453,58 c	502,20 c	503,46 c	557,06 b	594,35 c
Catucaí Amarelo	410,62 a	402,66 a	405,77 a	416,87 c	439,57 a	472,92 b	507,43 c	565,56 c	591,29 c
Acaíá	406,04 a	399,77 a	414,03 b	406,99 a	436,21 a	466,08 a	471,01 a	547,20 a	578,28 a
Rubi	431,02 b	430,80 c	416,62 b	425,20 d	449,95 c	465,83 a	485,52 b	546,66 a	586,96 b

As médias de letras diferente diferem estatisticamente entre si pelo teste de média Scott-knott ao nível de 5% de probabilidade.

**FIGURA 2A - Resumo do teste de média da composição dos valores experimentais médios da variável Porosidade analisada.**

Porosidade (%)									
Variedades	Níveis de umidade (% b.u.)								
	9,72	12,03	13,49	19,68	26,15	28,90	35,06	42,43	47,51
Catuai	70,02 a	70,27 a	65,22 a	67,98 a	67,06 a	61,20 a	62,48 b	54,76 a	49,98 a
Catucai Vermelho	69,13 a	70,73 a	63,68 a	68,41 a	63,95 a	59,89 a	55,96 a	51,94 a	47,91 a
Catucai Amarelo	71,69 a	71,22 a	70,77 b	68,58 a	65,77 a	63,22 a	55,53 a	52,67 a	46,27 a
Acaiaá	70,65 a	71,04 a	67,48 a	71,32 a	65,63 a	62,53 a	59,77 b	51,91 a	46,96 a
Rubi	73,66 a	74,33 a	72,29 b	65,22 a	65,19 a	62,98 a	53,98 a	52,28 a	45,04 a

As médias de letras diferente diferem estatisticamente entre si pelo teste de média Scott-knott ao nível de 5% de probabilidade.

**FIGURA 3A - Resumo do teste de média da composição dos valores experimentais médios da variável Calor específico analisada.**

Calor específico ( KJ. Kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )									
Variedades	Níveis de umidade (% b.u.)								
	9,72	12,03	13,49	19,68	26,15	28,90	35,06	42,43	47,51
Catuai	1,167 a	1,129 a	1,171 a	1,453 a	1,649 b	1,682 a	1,781 a	2,561 b	2,971 a
Catucaí Vermelho	1,143 a	1,331 b	1,145 a	1,549 b	1,439 a	1,758 a	1,779 a	2,475 b	3,063 a
Catucaí Amarelo	1,043 a	1,213 a	1,101 a	1,305 a	1,842 b	1,876 b	2,209 b	2,284 a	3,023 a
Acaia	1,199 a	1,248 a	1,312 a	1,628 b	1,697 b	1,714 a	2,018 b	2,433 b	2,852 a
Rubi	1,480 b	1,446 b	1,653 b	1,551 b	1,642 b	1,928 b	2,081 b	2,862 c	3,290 b

As médias de letras diferente diferem estatisticamente entre si pelo teste de média Scott-knott ao nível de 5% de probabilidade.

**FIGURA 4A - Resumo do teste de média da composição dos valores experimentais médios da variável Condutividade térmica analisada.**

Condutividade térmica ( W. m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )									
Variedades	Níveis de umidade (% b.u.)								
	9,72	12,03	13,49	19,68	26,15	28,90	35,06	42,43	47,51
Catuai	0,128 b	0,131 b	0,114 a	0,118 b	0,125 b	0,122 a	0,141 a	0,159 a	0,208 d
Catucaí Vermelho	0,117 a	0,122 b	0,119 a	0,111 a	0,115 a	0,128 a	0,132 a	0,162 a	0,169 a
Catucaí Amarelo	0,109 a	0,113 a	0,116 a	0,108 a	0,131 b	0,132 a	0,144 a	0,164 a	0,195 c
Acaiaá	0,119 a	0,119 a	0,121 a	0,124 b	0,124 b	0,132 a	0,138 a	0,160 a	0,186 b
Rubi	0,118 a	0,123 b	0,112 a	0,121 b	0,107 a	0,123 a	0,134 a	0,157 a	0,198 c

As médias de letras diferente diferem estatisticamente entre si pelo teste de média Scott-knott ao nível de 5% de probabilidade.

**FIGURA 5A - Resumo do teste de média da composição dos valores experimentais médios da variável Difusividade térmica analisada.**

Difusividade térmica ( m <sup>2</sup> . s <sup>-1</sup> ) x10 <sup>-7</sup>									
Variedades	Níveis de umidade (% b.u.)								
	9,72	12,03	13,49	19,68	26,15	28,90	35,06	42,43	47,51
Catuai	2,57 b	2,73 c	2,30 b	1,94 b	1,70 b	1,53 a	1,64 b	1,12 a	1,17 a
Catucaí Vermelho	2,48 b	2,31 b	2,57 c	1,74 a	1,76 b	1,45 a	1,47 b	1,17 a	0,93 a
Catucaí Amarelo	2,54 b	2,35 b	2,60 c	2,00 b	1,62 b	1,49 a	1,30 a	1,27 a	1,09 a
Acaíá	2,47 b	2,41 b	2,26 b	1,88 b	1,68 b	1,66 a	1,45 b	1,20 a	1,13 a
Rubi	1,85 a	1,98 a	1,63 a	1,67 a	1,45 a	1,37 a	1,33 a	1,00 a	1,03 a

As médias de letras diferente diferem estatisticamente entre si pelo teste de média Scott-knott ao nível de 5% de probabilidade.