

CALOR ESPECÍFICO E CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE CINCO VARIEDADES DE CAFÉ CEREJA DESCASCADO¹

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

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

RESUMO: Este trabalho foi desenvolvido com os objetivos de determinar, experimentalmente, os valores de calor específico e condutividade térmica e ajustar equações matemáticas para relacionar essas propriedades com o teor de água de cinco diferentes cultivares de café em pergaminho: Catuaí, Catucaí vermelho, Catucaí amarelo, Acaiá e Rubi. Para determinação do calor específico foi utilizado o método das misturas. A condutividade térmica da massa granular de café foi determinada utilizando um equipamento experimental, com base no método do cilindro teoricamente infinito e na hipótese de condução unidimensional, na direção radial, do calor gerado por um fio condutor. Os valores observados foram submetidos à análise de regressão, os quais se ajustaram melhor a uma equação polinomial do segundo grau. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que o calor específico e a condutividade térmica do café em pergaminho aumentaram com a elevação do teor de água do produto. Entretanto, não foi possível ajustar um modelo matemático único para as cinco variedades estudadas, indicando haver efeito da interação teor de água e variedade.

Palavras-chave: café descascado, calor específico, condutividade térmica, teor de água, variedades.

SPECIFIC HEAT AND THERMAL CONDUCTIVITY OF PULPED CHERRY FROM FIVE COFFEE VARIETIES

ABSTRACT: This research was developed with the objective to determine, experimentally, the values of specific heat and thermal conductivity and to adjust a model for correlation these properties with moisture content for five different varieties of coffee in parchment: Catuaí, Catucaí vermelho, Catucaí amarelo, Acaiá and Rubi. For the determination of the coffee granular mass specific heat was used the mixtures method. The coffee granular mass thermal conductivity was determined using experimental equipment based on the cylinder theoretically infinite method and conduction unidimensional hypothesis. The heat

direction generated by a conductive wire was considered radial. The observed values were submitted to a regression analysis, which were better adjusted by a second-degree polynomial equation. It was concluded that the values of specific heat and thermal conductivity of coffee in parchment increased with the increase of the moisture content of the product. However, it was not possible to adjust a single mathematical model for the five varieties studied which points out an interaction effect of the moisture content and the varieties.

Key words: peeled coffee, specific heat, thermal conductivity, moisture content, varieties.

INTRODUÇÃO

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

A opção recente pelo processamento do café cereja descascado deve-se tanto à redução que representa na área ocupada no terreiro, aumentando, assim, sua capacidade de processamento, como também, segundo Dias e Barros (1993), à melhoria de qualidade e redução do custo de secagem.

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 calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica são relevantes em estudos de transferência de calor e massa de grãos.

Para determinação da quantidade de energia requisitada nos processos de aquecimento e resfriamento de alimentos, é de fundamental importância o conhecimento do calor específico, que, por definição, é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de um corpo em 1°C, por unidade de massa, sem mudança de estado.

Segundo Incropera e Dewitt (1992), toda vez que houver 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 escoar 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.

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. No entanto, pouco se sabe a respeito dessas propriedades termofísicas para o café cereja descascado.

Considerando a franca expansão do uso do 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 térmicas relatadas para café descascado, este trabalho buscou determinar as variações dos valores de calor específico e condutividade térmica de cinco diferentes variedades de café cereja descascado em função do teor de água.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido na Universidade Federal de Lavras e no Laboratório de Propriedades Físicas e Avaliação de Qualidade de Produtos Agrícolas do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), situado no campus da Universidade Federal de Viçosa-MG. Foram avaliados o calor específico e a condutividade térmica de cinco variedades de café cereja descascado, mantendo-se a temperatura ambiente constante de 20°C.

Cerca de 500 litros de café (*Coffea arabica* L.) de cinco variedades (Acaiá, Rubi, Catuai, Catucaí Amarelo e Catucaí Vermelho), com umidade média de 55% b.u, foram colhidos manualmente sobre pano no setor de cafeicultura da Universidade Federal de Lavras - UFLA. Após a colheita, o café, de cada uma das variedades, foi lavado e separado em café bóia, verde e cereja. A porção formada pelo café cereja foi descascada em um descascador mecânico, acondicionada em seguida em sacos de polietileno trançado e colocada em terreiro de cimento para remoção do excesso de água. Amostras de cada variedade foram retiradas, para determinação do teor de água. A fim de evitar possíveis alterações no café em função do seu alto teor de água, todo o material foi mantido em câmara fria a 5°C.

Para obter os demais níveis de umidade, cerca de 5 kg de café úmido, de cada uma das variedades, foram colocados em estufa com ventilação forçada, com temperatura constante de 60°C.

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

Catuaí: 9,05; 12,87; 14,24; 17,60; 26,22; 28,40; 34,66; 43,19; 47,90. Catuaí Vermelho: 10,16; 12,96; 13,62; 20,71; 27,18; 29,65; 33,37; 41,18; 45,27.

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

Acaia: 9,60; 11,87; 13,63; 17,88; 24,55; 27,87; 35,91; 40,78; 47,66. Rubi: 9,69; 11,08; 12,43; 22,75; 27,55; 29,16; 37,15; 42,90; 48,73.

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

Para determinação do calor específico da massa de grãos de café cereja descascado, foi utilizado o método da mistura direta, que consiste em utilizar um recipiente isolado (calorímetro), de capacidade calorífica conhecida, com um líquido inerte (Kazarian e Hall, 1965; Mohsenin, 1980). A amostra de café, a uma temperatura diferente da do líquido calorimétrico (água), foi colocada em um calorímetro de mistura direta a pressão constante e temperatura ambiente de 20°C. Foram realizadas três repetições para cada tratamento. Atingido o equilíbrio térmico, o calor específico do produto foi calculado, utilizando a equação 1.

$$C_p \cdot m_p \cdot (T_5 - T_4) = C_a \cdot (m_1 + m_2) \cdot (T_3 - T_5) + C_{\text{cal}} \cdot (T_3 - T_5) \quad (1)$$

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) ($^\circ\text{C}$).

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, segundo metodologia descrita por Muir e Chandra (1970). Antes da determinação da condutividade térmica, as amostras foram colocadas na câmara B.O.D., onde estava o cilindro. Após o equilíbrio térmico entre o ambiente e o produto, preencheu-se o cilindro com o material a ser analisado. Por um fio resistor no eixo central do cilindro 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.

A condutividade térmica da massa do grão de café foi obtida em regime transiente, por coordenadas cilíndricas, a partir da equação 2, de acordo com Muir e Chandra (1970) e Chang (1986).

$$K = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot (T_f - T_i)} \cdot \ln \left(\frac{\theta_2 - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} \right) \quad (2)$$

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 ($^\circ C$);

θ_2 : instante final do intervalo usado para determinar a condutividade térmica (s);

θ_1 : instante inicial do intervalo usado para determinar a condutividade térmica (s);

θ_0 : fator de correção de tempo (s).

Para obtenção do fator de correção θ_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 θ_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).

Os dados foram submetidos a análises estatísticas quantitativas, determinando-se as equações de regressão a 95% de confiabilidade, com base nos coeficientes de determinação R^2 apresentados,

objetivando determinar a natureza e o comportamento da curva de resposta destas em função dos tratamentos propostos. As análises de regressão foram precedidas de uma análise de variância, a fim de comprovar estatisticamente se os dados apresentavam diferença significativa entre os tratamentos. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC), em três repetições, com um fator variante (teor de água) nos nove níveis de umidade.

O modelo de regressão foi apresentado por:

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

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

em que

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

d_{ij} : efeito do desvio de regressão;

x_j : i -ésimo teor de água;

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

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

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da análise de variância do efeito das variedades e do teor de água sobre o calor específico e a condutividade térmica. Observou-se que a interação variedade x teor de água afetou significativamente, em nível de 5% de probabilidade ($P < 0,05$), os valores das propriedades térmicas 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.

Considerando que tanto a equação linear como a quadrática são modelos simples e explicam satisfatoriamente as variações das propriedades térmicas 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.

Os valores observados e estimados do calor específico e da condutividade térmica, bem como as equações ajustadas, são apresentados nas Figuras 1 e 2. Observa-se que ambos aumentaram 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 Catuaí Vermelho.

Tabela 1 - Resumo da análise de variância do calor específico e da condutividade térmica para cinco variedades de café cereja descascado e nove teores de água

Fonte de Variação	GL	Calor Específico	Condutividade Térmica
Variedade	4	0,314293	0,000250*
Teor de água	8	1,126627	0,001925*
Variedade x Teor de água	32	0,314293	0,000250*
Resíduo	90	0,011267	0,000037
CV(%)		5,88	4,50
Média geral		1,8043037	0,1348896

- Significativo a 5% de probabilidade.

Observa-se que, apesar de os valores do calor específico situarem-se entre 1,00 e 3,00 $\text{kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$ e os da condutividade térmica, entre 0,10 e 0,20 $\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$, para todas as variedades estudadas nos teores de água entre 9,72 e 47,51%, não foi possível ajustar uma única equação para todas as variedades. Dessa 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.

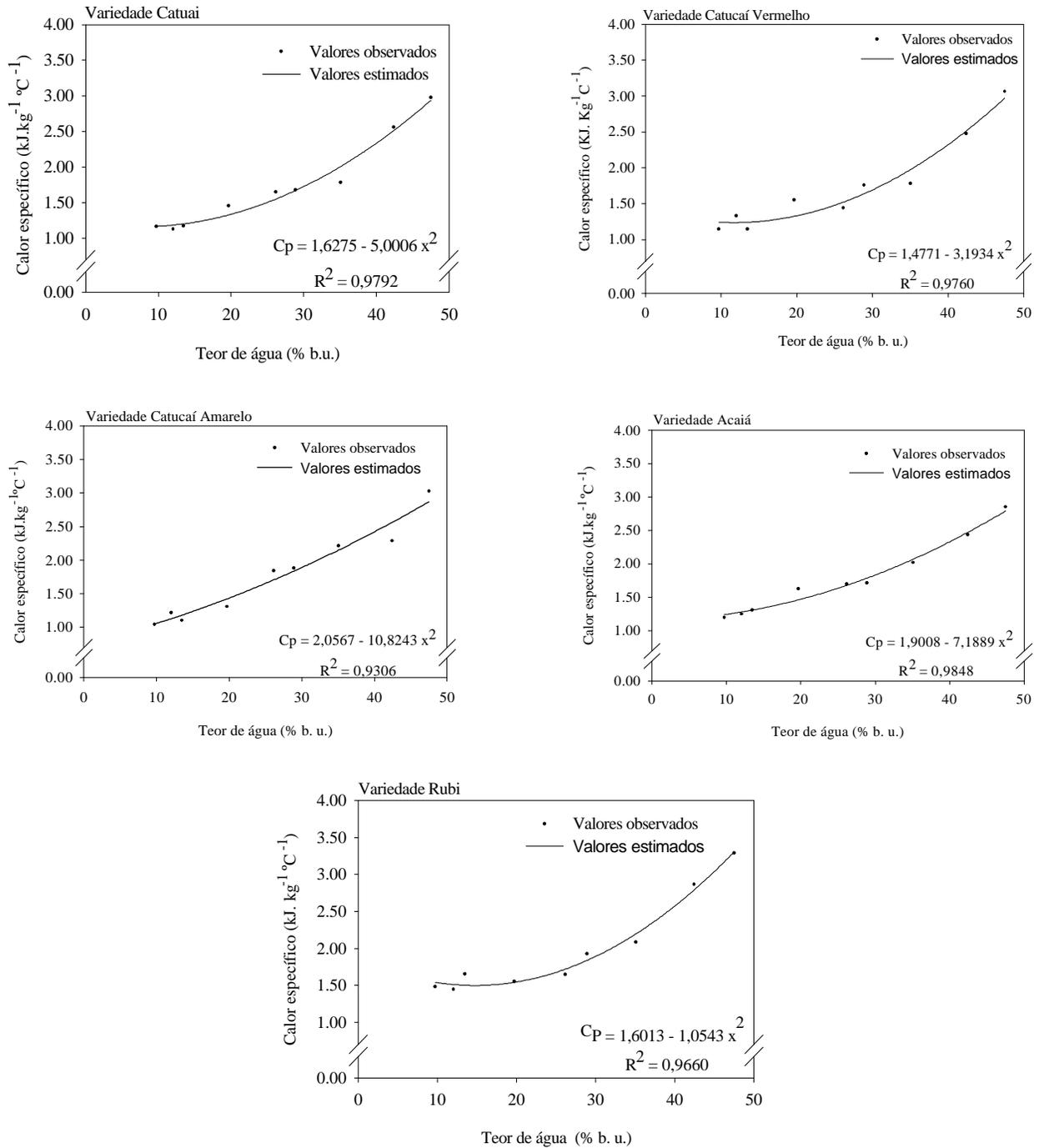


Figura 1 - Gráfico do calor específico das variedades Catuai, Catuai Vermelho, Catuai Amarelo, Acaiá e Rubi.

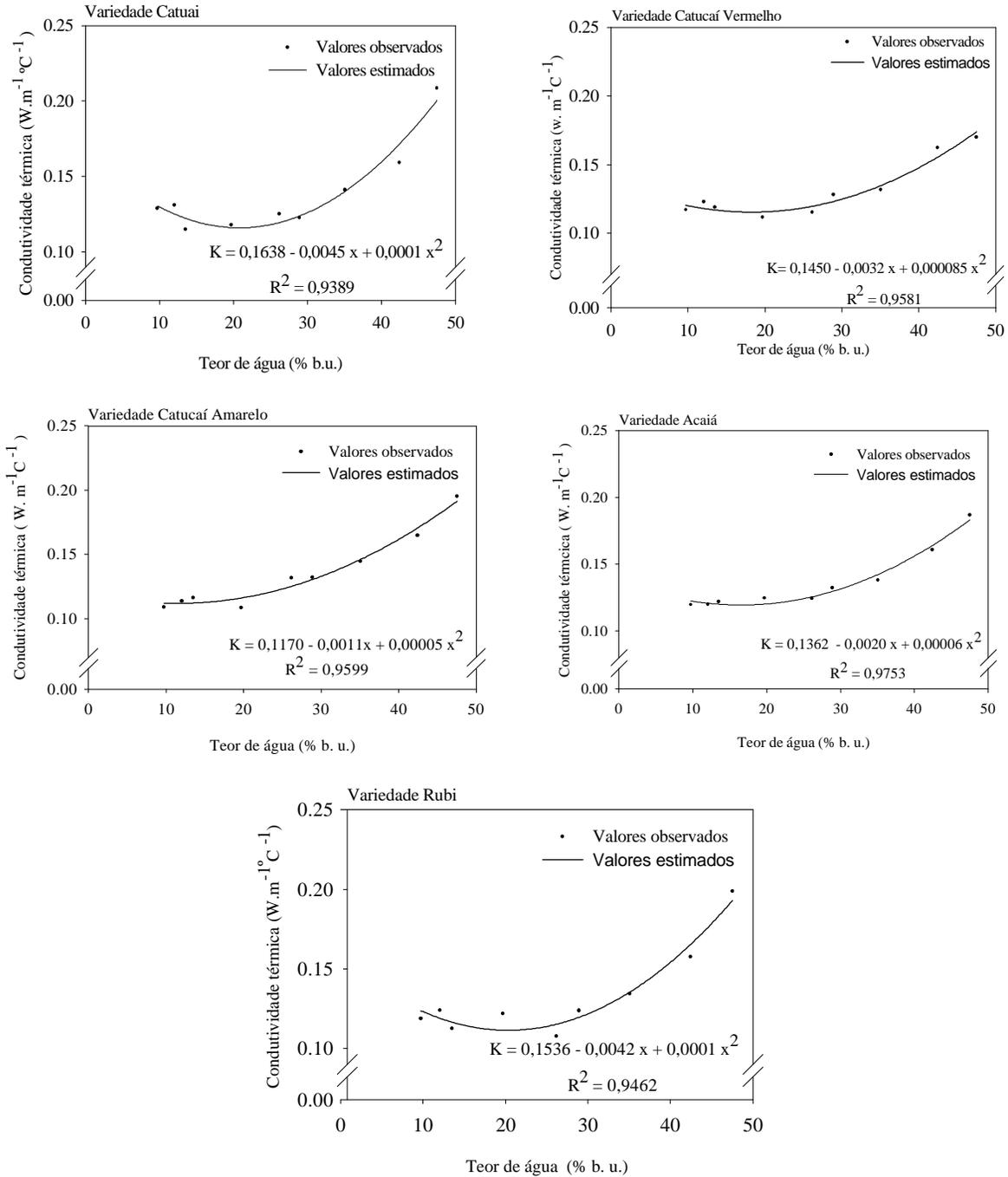


Figura 2 - Gráficos de condutividade térmica das variedades Catuaí, Catuaí Vermelho, Catuaí Amarelo, Acaiaí e Rubi

CONCLUSÃO

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

- Os valores do calor específico variaram entre 1,00 e 3,00 $\text{kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$, e os da condutividade térmica, entre 0,10 e 0,20 $\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$, para todas as variedades estudadas nos teores de água entre 9,72 e 47,51%.
- Os valores do calor específico e da condutividade térmica variaram significativamente ($P < 0,05$) em função das variedades estudadas.
- Não foi possível ajustar uma única equação para cada uma das propriedades térmicas estudadas para todas as variedades em função do teor de água.
- O calor específico e a condutividade térmica aumentaram com o aumento do teor de água para todas as variedades estudadas.
- A equação polinomial de 2º grau foi a que melhor se ajustou aos dados observados para todas as variedades analisadas.

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.
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma agrária, **Regras para análise de sementes (RAS)**, Brasília, 1992. 365p.
- 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.
- 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.
- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 1992. 380p.
- KAZARIAN, E.A.; HALL, C.W. Thermal properties of grain. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.8, n.1, p.33-38, 1965.

MOHSEIN, N.N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. New York: Gordon and Breach science publishers Inc., 1980. 407p.

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.