

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**BANCO DE DADOS DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS
DE PRODUTOS HORTÍCOLAS**

JULIANA SWENSSON DE MATTOS

CAMPINAS
AGOSTO DE 2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

BANCO DE DADOS DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE PRODUTOS HORTÍCOLAS

Dissertação de mestrado submetida à banca
examinadora para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Agrícola na área de tecnologia de
processos.

JULIANA SWENSSON DE MATTOS
Orientadora: Bárbara Janet Teruel Mederos

CAMPINAS
AGOSTO DE 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

M436b Mattos, Juliana Swensson de
 Banco de dados de propriedades termofísicas de
 produtos hortícolas / Juliana Swensson de Mattos. --
 Campinas, SP: [s.n.], 2007.

 Orientador: Bárbara Janet Teruel Mederos
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

 1. Difusividade térmica. 2. Calor – Condução. 3.
 Calor específico. 4. Frutas. 5. Hortaliças. I. Teruel
 Mederos, Bárbara Janet. II. Universidade Estadual de
 Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III.
 Título.

Título em Inglês: Database of thermophysical properties of fruits and
 vegetables

Palavras-chave em Inglês: Thermal diffusivity, Thermal conductivity, Specific
 heat, Fruits, Vegetables

Área de concentração: Tecnologia Pós-Colheita

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola.

Banca examinadora: Ana Lúcia Gabas e Kil Jin Park

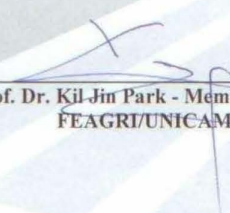
Data da defesa: 30/08/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Juliana Swensson de Mattos**, aprovada pela Comissão Julgadora em 30 de agosto de 2007, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.


Profª Drª Bárabara Janet Teruel Mederos
FEAGRI/UNICAMP


Profª Drª Ana-Lúcia Gabas - Membro Titular
FZEA/USP


Prof. Dr. Kil-Jin Park - Membro Titular
FEAGRI/UNICAMP

Faculdade de
Engenharia Agrícola
Unicamp

Dedico meu trabalho a meu pai, *in memorian*.

Epigrafe

“É melhor tentar e falhar,
que preocupar-se e ver a vida passar;
é melhor tentar, ainda que em vão,
que nada fazer.

Eu prefiro na chuva caminhar,
que em dias tristes em casa me esconder.
Prefiro ser feliz, embora louco,
que em conformidade viver ...”

Martin Luther King

“Todas as maravilhas de que precisas estão dentro de ti.”

Sir Thomas Browne

Agradecimentos

Agradeço a meu pai, Antonio Carlos de Mattos, *in memoriam*, que sempre foi um exemplo de vida em todos os sentidos para mim, que me ensinou os valores mais preciosos da vida e da alma. A minha mãe, Zita Swensson de Mattos, minha guru, que me acompanha em todos os momentos da minha vida, com sua força extraordinária e amor infinito.

A meus irmãos Mauro e Marília que amo demais e que estão sempre prontos para me apoiar. A minha prima, Luciana, que me acolheu e me ensinou muitas coisas durante nosso tempo juntas e aos meus primos queridos, Teresa, Luiz, Melina, Dudu e que me acolheram, e me ajudaram muito ao longo desta jornada.

Especial agradecimento a minha tia Beth que me ajudou muito passando seu enorme conhecimento, carinho e motivação.

Aos meus queridos amigos do coração, Maria Helena e Marcio, que devo imenso agradecimento pela força e ensinamento tanto de vida quanto na área da ciência.

A minha orientadora Bárbara, que foi muito solícita aos meus pedidos complementando minhas sugestões sempre de forma construtiva e inteligente.

À Faculdade de Engenharia Agrícola e à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Unicamp.

Ao CNPq que proporcionou meios para que me dedicasse exclusivamente ao Mestrado.

Aos meus amigos do coração, Marcos e Marcelo.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. OBJETIVOS GERAIS	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. REVISÃO DE LITERATURA	5
3.1. PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS	5
3.1.1. Densidade	5
3.1.2. Teor de Umidade	9
3.1.3. Concentração de Sólidos Solúveis	10
3.1.4. Condutividade Térmica	10
3.1.5. Difusividade Térmica	11
3.2. MÉTODOS ESTACIONÁRIOS PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS	13
3.2.1. Métodos de Fluxo de Calor Longitudinal	14
3.2.2. Métodos de Fluxo de Calor Radial	14
3.3. MÉTODOS DE REGIME TRANSIENTE PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS	15
3.3.1. Método de Fitch	16
3.3.2. Método da Fonte Linear de Calor	16
3.3.3. Método proposto por Dickerson	21
3.4. CALOR ESPECÍFICO	25
3.4.1. Modelos Experimentais para o Cálculo do Calor Específico	26
3.4.1.1. Método das Misturas	26
3.4.1.2. Método do Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC)	28
3.5. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	30
4. MATERIAL E MÉTODOS	33
4.1. MATERIAL	33
4.1.1. Frutas	33
4.1.2. Hortaliças	33
4.1.3. Equipamentos acessórios e outros materiais	34
4.2. MÉTODOS	34
4.2.1. Densidade	37
4.2.2. Sólidos solúveis	38
4.2.3. Teor de umidade	38

4.2.4.	Difusividade Térmica	39
4.2.5.	Condutividade Térmica	42
4.2.5.1	Aproximação geral da Equação de Fourier	42
4.2.5.2	Fonte Linear de Calor	42
4.2.6.	Calor Específico	46
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1.	UMIDADE	49
5.2.	DENSIDADE E SÓLIDOS SOLÚVIES	51
5.3.	DIFUSIVIDADE TÉRMICA	53
5.3.1.	Maracujá	54
5.3.2.	Tangerina ponkã	54
5.3.3.	Graviola	54
5.3.4.	Caju	54
5.3.5.	Acerola	55
5.4.	CALOR ESPECÍFICO	58
5.5.	CONDUTIVIDADE TÉRMICA	60
5.5.1.	Condutividade Térmica pelo Método da Fonte Linear de Calor	60
5.5.1.1.	Condutividade térmica da abóbora	61
5.5.1.2.	Condutividade térmica da berinjela	62
5.5.1.3.	Condutividade térmica da cebola	64
5.5.1.4.	Condutividade térmica do chuchu	66
5.5.1.5.	Condutividade térmica da banana nanica	67
5.5.1.6.	Condutividade térmica do caju	70
5.5.1.7.	Condutividade térmica do mamão formosa	71
5.5.2.	Condutividade Térmica calculada a partir da aproximação geral da Equação de Fourier	78
5.5.3.	Comparações entre: Método da Sonda e aproximação geral da Equação de Fourier para polpa de fruta e produto in natura.	80
5.6.	RESUMO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	82
5.7.	COMPILAÇÃO DE UM BANCO DE DADOS DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS	83
5.7.1.	Valores de densidade (ρ) de produtos hortícolas	84
5.7.2.	Valores de Calor Específico (C_p) de produtos hortícola	97
5.7.3.	Valores de condutividade térmica (k) de produtos hortícolas	105
5.7.4.	Valores de difusividade térmica (α) de produtos hortícolas	110
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	115
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
ANEXO 1.	Análise Estatística	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma para preparo das amostras das polpas de frutas	35
Figura 2 . Fluxograma para preparo das frutas e hortaliças <i>in natura</i>	37
Figura 3. Estufa a vácuo, para determinação da umidade de frutas e hortaliças. (Laboratório de Engenharia de Sistemas Agroalimentares, Faculdade de Engenharia de Alimentos/UNICAMP).....	39
Figura 4. Cápsula cilíndrica de cobre com termopares. (Laboratório de Engenharia de Sistemas Agroalimentares – Faculdade de Engenharia de Alimentos/UNICAMP).....	40
Figura 5. Esquema da metodologia usada para determinação da difusividade térmica.	41
Figura 6. Banho termostático com cápsula metálica. (Laboratório de Engenharia de Sistemas Agroalimentares – Faculdade de Engenharia de Alimentos/UNICAMP).....	41
Figura 7. Esquema da sonda de condutividade térmica.....	43
Figura 8. Calorímetro de Mistura. (Laboratório de Engenharia de Sistemas Agroalimentares , Faculdade de Engenharia de Alimentos/UNICAMP).	48
Figura 9. Valores experimentais de densidade de polpas de frutas em função do °Brix e modelos de predição.	52
Figura 10. Diferenças de temperatura entre a superfície e o centro da cápsula metálica, em função do tempo, para determinação da difusividade da polpa de acerola, onde T_s é a temperatura na superfície e T_c é a temperatura no centro.	56
Figura 11. Evolução da temperatura com o tempo da polpa de acerola, para determinação da difusividade térmica.	56
Figura 12. Equações das retas, cujos coeficientes angulares exprimem a taxa constante de aquecimento da polpa de acerola, para a determinação da difusividade térmica, onde T_s é a temperatura na superfície e T_c é a temperatura no centro.	57
Figura 13. Evolução do $\ln(t)$ versus $(T_2 - T_1)$ para o cálculo do coeficiente angular da condutividade térmica da abóbora e equação da reta (repetição nº 9).....	62
Figura 14: Evolução do $\ln(t)$ versus $(T_2 - T_1)$ para o cálculo do coeficiente angular e da condutividade térmica da berinjela e equação da reta (repetição nº 3).....	63
Figura 15. Evolução do $\ln(t)$ versus $(T_2 - T_1)$ para o cálculo do coeficiente angular da condutividade térmica da cebola e equação da reta (repetição nº 5).	65
Figura 16. Evolução do $\ln(t)$ versus $(T_2 - T_1)$ para os cálculos do coeficiente angular e da condutividade térmica de chuchu e equação da reta (repetição nº1).	66
Figura 17. Evolução do $\ln(t)$ versus $(T_2 - T_1)$ para o cálculo do coeficiente angular da condutividade térmica da banana nanica _ensaio 1, e equação da reta (repetição nº 9). ..	68
Figura 18. Evolução do $\ln(t)$ versus $(T_2 - T_1)$ para os cálculos do coeficiente angular e da condutividade térmica da banana nanica _ensaio 2, e equação da reta (repetição nº1). ..	69
Figura 19. Evolução do $\ln(t)$ versus $(T_2 - T_1)$ para os cálculo do coeficiente angular e da condutividade térmica do caju e equação da reta (repetição nº 10).....	70
Figura 20. Evolução do $\ln(t)$ versus $(T_2 - T_1)$ para os cálculos do coeficiente angular e da condutividade térmica do mamão formosa _ensaio 1, e equação da reta (repetição nº 5).	72
Figura 21. Evolução do $\ln(t)$ versus $(T_2 - T_1)$ para os cálculos do coeficiente angular e da condutividade térmica do mamão formosa – ensaio 2, e equação da reta (repetição nº 1).	73
Figura 22. Evolução do $\ln(t)$ versus $(T_2 - T_1)$ para os cálculos do coeficiente angular e da condutividade térmica de manga Tommy Atkins e equação da reta (repetição nº 6).....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores experimentais de umidade das amostras de polpas de fruta, médias, desvios padrões e coeficientes de variação.....	49
Tabela 2: Valores experimentais de umidade das amostras de produtos hortícolas, médias, desvios padrões e coeficientes de variação.....	50
Tabela 3: Valores experimentais médios de sólidos solúveis (Brix), densidade e seus respectivos desvios padrões e coeficientes de variação.....	51
Tabela 4: Valores experimentais médios de densidades das polpas de frutas com modelos de predição encontrados na literatura.....	53
Tabela 5: Valores experimentais de difusividade da polpa de maracujá.....	54
Tabela 6: Valores experimentais de difusividade da polpa de tangerina ponkã.....	54
Tabela 7: Valores experimentais de difusividade da polpa de graviola.....	54
Tabela 8: Valores experimentais de difusividade da polpa de caju.....	54
Tabela 9: Valores experimentais de difusividade da polpa de acerola.....	55
Tabela 10: Valores médios da difusividade térmica experimental e dos modelos propostos e seus erros percentuais.....	58
Tabela 11: Valores experimentais de Calor Específico das amostras de polpas de fruta, médias, desvios padrões e coeficientes de variação.....	59
Tabela 12: Valores médios de Calor Específico experimental e dos modelos propostos e seus erros percentuais.....	60
Tabela 13: Resultados experimentais de condutividade térmica de abóbora.....	62
Tabela 14: Resultados experimentais de condutividade térmica de berinjela.....	64
Tabela 15: Resultados experimentais e os valores de condutividade térmica de cebola.....	65
Tabela 16: Resultados experimentais de condutividade térmica de chuchu.....	67
Tabela 17: Resultados experimentais de condutividade térmica de banana nanica_ensaio 1.....	68
Tabela 18: Resultados experimentais de condutividade térmica de banana nanica_ensaio 2.....	69
Tabela 19: Resultados experimentais de condutividade térmica de caju.....	71
Tabela 20: Resultados experimentais de condutividade térmica de mamão formosa_ensaio 1.....	72
Tabela 21: Resultados experimentais de condutividade térmica de mamão formosa_ensaio 2.....	74
Tabela 22: Resultados experimentais de condutividade térmica de manga Tommy Atkins.....	75
Tabela 23: Resultados experimentais de condutividades térmicas de frutas e hortaliças <i>in natura</i>	76
Tabela 24: Valores médios das condutividades térmicas determinadas experimentalmente e através dos modelos propostos, e seus erros percentuais, de hortaliças e frutas.....	77
Tabela 25: Valores de condutividade térmica calculados pela aproximação geral da Equação de Fourier, médias, desvios padrões e coeficientes de variação.....	79
Tabela 26: Valores experimentais da condutividade térmica para caju <i>in natura</i> e os calculados pela aproximação geral da Equação de Fourier com polpa de caju.....	80
Tabela 27: Teste f para condutividade térmica de caju.....	81
Tabela 28: Teste t para condutividade térmica de caju.....	81

Tabela 29: Valores das propriedades termofísicas de frutas <i>in natura</i> obtidas experimentalmente.....	82
Tabela 30: Valores das propriedades termofísicas de polpas de frutas obtidas experimentalmente.....	82
Tabela 31: Valores das propriedades termofísicas de hortaliças <i>in natura</i> obtidas experimentalmente.....	83
Tabela 32: Valores de densidade (ρ) de produtos hortícolas.....	84
Tabela 33: Valores de calor específico (C_p) de produtos hortícolas.....	97
Tabela 34: Valores de condutividade térmica (k) de produtos hortícolas.....	105
Tabela 35: Valores de difusividade (α) de produtos hortícolas.....	110

RESUMO

Frutas e hortaliças, após a colheita, podem ser submetidas a processos térmicos, dentre os quais: aquecimento, resfriamento e congelamento. O conhecimento das propriedades termofísicas: densidade, calor específico, condutividade e difusividade térmica, é de grande importância, para o dimensionamento de equipamentos utilizados para o controle dos processos que envolvem transferência de calor. Devido à heterogeneidade da composição dos materiais biológicos, a modelagem e otimização dos processos, dependem de parâmetros como: teor de umidade, estrutura do produto e faixa de temperatura utilizada, que podem variar durante o processo.

Os valores experimentais de propriedades termofísicas de frutas e hortaliças podem ser determinados por diversos métodos, variando os seguintes parâmetros: temperatura, concentração de sólidos solúveis e umidade. Uma grande quantidade desses dados encontra-se publicada na literatura nacional e internacional, porém ainda dispersos, não disponíveis em um banco de dados que agrupe os valores das propriedades por tipo de produto, método e faixa de temperatura utilizada, erro ou desvio padrão, equações, dentre outras informações. Para alguns produtos esses dados são inexistentes, impondo a necessidade de assumir, como referência, valores das propriedades de outros considerados semelhantes, mas que podem provocar erros consideráveis de dimensionamento de equipamentos e de processos.

Esta problemática motivou o desenvolvimento do trabalho aqui apresentado, objetivando a elaboração de um banco de dados de propriedades termofísicas de frutas e hortaliças, agrupadas e classificadas, após revisão bibliográfica nas diversas fontes disponíveis. Após o agrupamento e elaboração do banco de dados preliminar, constatou-se a falta de informações para algumas frutas e hortaliças de variedades nacionais, o que motivou a determinação das propriedades mencionadas, para alguns desses produtos.

Para frutas e hortaliças *in natura* foram determinados: teor de umidade e condutividade térmica (Método da Fonte Linear de Calor ou Sonda). As frutas *in natura* utilizadas para os experimentos foram: banana nanica, manga Tommy Atkins, mamão formosa, e caju e as hortaliças *in natura*, chuchu, berinjela, cebola e abóbora. Para polpas de frutas foram determinados: teor de umidade, concentração de sólidos solúveis (Brix), difusividade térmica (Método de Dickerson), calor específico (Método das Misturas), e densidade (Método do Picnômetro). Com estas propriedades calculou-se a condutividade térmica, pela equação de

Fourier, das polpas. As frutas utilizadas para os experimentos foram: maracujá, tangerina, ponkã, graviola, caju e acerola.

Os valores das propriedades determinadas ficaram próximos aos das faixas reportados na literatura e os modelos propostos forneceram bons ajustes, com erros percentuais entre 0% e 29%, com exceção da berinjela, que apresentou valores inferiores aos modelos propostos.

PALAVRAS CHAVES: difusividade térmica; condutividade térmica; calor específico; frutas; hortaliças

ABSTRACT

Fruits and vegetables, after the harvest, can be submitted to thermal processes such as heating, cooling and freezing. In such way, the knowledge of thermophysical properties as density, specific heat, thermal conductivity and thermal diffusivity, play an important role for both, effective design of food processing equipment, and for the control of the processes that involve heat exchangers. Due to the complexity of biological materials, the modeling and optimization of the processes depend on the following parameters: water content, and structure of the product and temperature, which may vary during the process.

The experimental values of thermophysical properties of fruits and vegetables can be determined through several methods, including the variation of temperature, soluble solid concentration and water content. A great amount of this data is found in national and international literature, however, the data is scattered and the values are not grouped for type of product, method used, temperature range, error or standard deviation, equations, besides other information. For some products, this data is not available, imposing the need to assume approached values, taking as reference the values of the properties of other products, what can cause considerable errors of calculation and dimension of equipment and processes.

This problem motivated the development of the work presented here, with the objective of the elaboration of a database of thermophysical properties of fruits and vegetables, (compiled and organized) grouped and classified, after literature review in several available sources. After compiling the preliminary database, we found lack of information of properties of some national varieties of fruits and vegetables.

The following properties for fruits and vegetables had been determined *in natura*: moisture content, and thermal conductivity (line heat source probe method). The fruits *in natura* used for the experiments were: Cavendish banana; mango cv. Tommy Atkins; papaya cv. Formosa; and cashew fruit. The vegetables *in natura* were: chayote; eggplant; onion; and pumpkin. The properties determined for fruit pulps were: moisture content; soluble solid (Brix); thermal diffusivity (Dickerson method); specific heat (Method of Mixtures); and density (Picnometric method). The values for thermal conductivity were obtained by the Fourier equation using the properties obtained above. The fruits used on the experiments were: passion fruit; tangerine cv. Ponkã; guanabana; cashew fruit; and west indian cherry.

The determined values of properties were close to the values reported in literature. The considered models had supplied good adjustments, with percentage errors between 0% and 29%, with the exception of eggplant that presented comparative lower values to the considered models.

KEY WORDS: thermal diffusivity; thermal conductivity; specific heat; fruits; vegetables

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a grande produção de frutas e hortaliças, contribui significativamente para o agronegócio, sendo responsável por 33% do Produto Interno Bruto (PIB), estimando-se um PIB no setor de R\$ 540,06 bilhões, em 2006. (BRASIL, 2005 e CEPEA-USP/CNA, 2006).

Em uma área plantada de 806,8 mil hectares, distribuída entre as regiões Sudeste (51%), Sul (20%), Nordeste e Centro-Oeste (26%), a safra brasileira de hortaliças do ano de 2002, atingiu a produção de 15,7 milhões de toneladas, no valor de US\$ 2.565 milhões. As hortaliças que tiveram o maior volume de produção e comercialização foram: batata (18,2%), tomate (22,3%), cebola (7,2%), cenoura e batata doce (3%) (FAO, 2005).

O setor frutícola, por sua parte, é um dos mais importantes segmentos do agronegócio brasileiro. Seu grande potencial de produção de frutas, junto ao crescimento das indústrias alimentícias, leva à ampliação do mercado interno e externo, trazendo como consequência a exigência de modernização, adequação tecnológica e maior qualidade para as indústrias, gerando maior competitividade.

Entre 2004 e 2006 o Brasil ocupou a terceira colocação entre os principais países produtores de frutas, com produção variando de 39 a 41 milhões de toneladas, representadas, principalmente, pelas culturas de laranja, banana, abacaxi, mamão, castanha-de-caju e castanha-do-pará. As exportações de frutas frescas e polpas vêm crescendo significativamente desde 1990, com taxa de crescimento anual de 18% a 27%, em média, sem incluir o mercado de suco de laranja e derivados, que tem o Brasil como maior produtor mundial (BRASIL, 2005 ; VILELA, 2006).

Frutas e hortaliças, após a colheita, podem ser submetidas a processos térmicos, dentre eles: aquecimento, resfriamento e congelamento. O conhecimento das propriedades termofísicas: densidade, calor específico, condutividade e difusividade térmica, é de grande importância, para o dimensionamento de equipamentos utilizados para o controle dos processos que envolvem transferência de calor. Devido à heterogeneidade da composição dos materiais biológicos, a modelagem e otimização dos processos, dependem de parâmetros como: teor de umidade, estrutura do produto e faixa de temperatura utilizada, que podem variar durante o processo.

Valores de propriedades termofísicas de frutas e hortaliças já foram determinados por diversos métodos, com variações de temperatura, concentração de sólidos solúveis e umidade, porém esses dados estão dispersos na literatura. Um banco de dados agrupando os valores dessas propriedades, mostrando o método utilizado, a faixa de temperatura, erro ou desvio padrão obtido, valores numéricos e equações, dentre outras informações ainda não está disponível.

Tabelas de propriedades termofísicas, como as disponibilizadas pela ASHRAE (1994), amplamente utilizadas no Brasil, apresentam as propriedades dos produtos sem mencionar a variedade, o método utilizado na determinação, as limitações, assim como as fontes de onde foram obtidas as informações.

A falta de dados de propriedades termofísicas de produtos hortícolas dificulta o dimensionamento de equipamentos e processos, sendo assumidos, na maioria das vezes, valores aproximados. Diante deste fato, o presente trabalho foi proposto com a finalidade de reunir dados de propriedades termofísicas de frutas e hortaliças, após levantamento bibliográfico, para agrupar, catalogar e organizar um banco de dados e também determinar propriedades termofísicas em frutas e hortaliças para as quais os dados são incompletos ou inexistentes.

O banco de dados que resultou deste trabalho, foi inserido no programa *CoolSys*, ferramenta computacional contendo os módulos de propriedades termofísicas, embalagens, condições de armazenamento e compatibilidade e simulação de processos de resfriamento de produtos hortícolas (Patente no. 091/2005), disponibilizado no *site* de Inovações Tecnológicas, da Faculdade de Engenharia Agrícola, para uso livre.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

- Elaborar e disponibilizar um banco de dados de propriedades termofísicas de frutas e hortaliças.
- Determinar as propriedades termofísicas de produtos hortícolas, de variedades nacionais ainda ausentes na literatura disponível.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar a literatura em periódicos, revistas, anais de congressos, banco de teses e dissertações, base de dados *on-line*, institutos de pesquisa, compilando e organizando, os valores disponíveis das propriedades termofísicas de frutas e hortaliças.
- Revisar na literatura, métodos mais utilizados para determinação de propriedades térmicas de frutas e hortaliças.
- Determinar experimentalmente os valores de condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico, densidade, teor de umidade e concentrações de sólidos solúveis, das frutas e hortaliças definidas, obtendo as possíveis relações entre as propriedades, com as variáveis: temperatura, umidade e concentração de sólidos solúveis.
- Comparar todos os resultados experimentais com o banco de dados elaborado e com modelos propostos por autores, calculando seus erros percentuais.
- Comparar os valores de condutividade térmica de polpas de fruta obtidos pelo Método de Fourier com os de Literatura e de modelos propostos.
- Comparar os valores de condutividade térmica obtidos pelo Método da Fonte Linear de Calor (Sonda), em produtos *in natura*, com aqueles obtidos aplicando a aproximação geral da Equação de Fourier, para polpas dos mesmos produtos.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

A maioria dos métodos de conservação de alimentos envolve transferência de energia em forma de calor. É importante que a exata quantidade de energia necessária para cada tipo de processo seja utilizada, a fim de reduzir os custos da operação e obter produtos com melhor qualidade.

O conhecimento das propriedades termofísicas e seu comportamento durante o processo são fatores limitantes na exatidão dos cálculos de taxas de transferência de calor.

Propriedades termofísicas de materiais biológicos dependem das características de cada produto, como, umidade, estrutura, composição centesimal, que podem variar dependendo do processo realizado.

Propriedades físicas e térmicas, como: densidade, umidade, concentração de sólidos solúveis, difusividade e condutividade térmicas, são muito utilizadas nos projetos de bombas, trocadores de calor, evaporadores, misturadores e em simulações de processos térmicos em regime transiente.

O calor específico e o calor latente determinam as quantidades de energia necessárias nos processos de resfriamento e de aquecimento, e são muito utilizadas nos processos de congelamento, cristalização e evaporação.

3.1.1. Densidade

A densidade de uma substância é definida pela razão entre sua massa e seu volume. Na maioria dos problemas de Engenharia, sólidos e líquidos são considerados incompressíveis, ou seja, a densidade é pouco afetada por mudanças moderadas de temperatura e pressão. Diferenças de densidades de fluidos aquecidos são responsáveis pela convecção natural. Na maioria dos casos, a densidade decresce com o aumento da temperatura. Pela teoria, se a composição de um alimento for conhecida, pode-se estimar a sua densidade pela fórmula:

$$\rho_a = \frac{1}{\frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2} + \frac{m_3}{\rho_3} + \dots + \frac{m_n}{\rho_n}} \quad \text{Eq. 1}$$

onde:

ρ_a = densidade do alimento (kg m^{-3});

m_1 a m_n - frações mássicas dos constituintes (adimensional);

ρ_1 a ρ_n - densidades dos constituintes (kg m^{-3}).

No entanto, esta equação não caracteriza o volume ocupado pelo alimento, não mostrando, por exemplo, sua quantidade de ar, e, como é muito difícil determinar o volume ocupado por cada constituinte do alimento, a fórmula acaba apresentando valores discrepantes para determinados produtos, como a maçã, que apresenta densidade de 1064 kg m^{-3} e no entanto, bóia na água, (LEWIS, 1987).

Segundo ALVARADO e ROMERO (1989), é esperada uma variação das densidades de sucos de frutas pelas suas composições e quantidades de sólidos solúveis, devido a diversos fatores como: tipo de fruta, características genéricas, variedade, grau de maturação, tamanho, nível nutricional da planta, práticas agrícolas, etc.

ALVARADO e ROMERO (1989), realizaram experimentos com diversos sucos e polpas de frutas com diferentes concentrações de sólidos e a diferentes temperaturas. Sugeriram várias relações para o cálculo da densidade, a mais simples delas variando apenas com o Brix da amostra, aplicável para sucos de frutas entre 5°Brix a 30°Brix e ($R=0,995$), (Equação 2):

$$\rho = 996 + 4,17.^{\circ}B \quad \text{Eq. 2}$$

onde:

ρ = densidade (kg m^{-3});

$^{\circ}B$ = concentração de sólidos solúveis (°Brix) ;

A segunda relação (Equação 3) apresenta a variação em °Brix e temperatura da amostra, com $R=0,982$. Pode ser usada para sucos e polpas de frutas, em faixa de temperatura entre 0°C e 80°C:

$$\rho = (1002 + 4,61 \cdot {}^{\circ}B) - 0,460T + 7,001 \cdot 10^{-3} T^2 - 9,175 \cdot 10^{-5} T^3 \quad \text{Eq. 3}$$

onde:

ρ = densidade (kg m^{-3});

${}^{\circ}B$ = concentração de sólidos solúveis (°Brix) ;

T = temperatura (°C).

Os mesmos autores desenvolveram equações polinomiais de terceiro grau para cada fruta estudada para a determinação de densidade e viscosidade em faixa de temperatura entre 0°C e 80°C, apresentada na tabela geral de propriedades termofísicas.

ZURITZ et al.(2004) apresentaram valores de densidade de suco de uva clarificado entre 1065,0 kg m^{-3} a 1358,4 kg m^{-3} , com temperaturas entre 20°C e 80°C e grau Brix entre 22,9° e 70,6° e propuseram um modelo polinomial (Equação 4) para representar a densidade em função da temperatura (absoluta) e °Brix com ($R=0,999$):

$$\rho = 1,0462 \times 10^3 + 1,9630 \times 10^{-1} \cdot T_{abs} + 3,8568 \cdot {}^{\circ}B + 1,1973 \times 10^{-3} \cdot T_{abs}^2 + 1,6533 \times 10^{-2} \cdot {}^{\circ}B^2 \quad \text{Eq. 4}$$

onde:

ρ = densidade (kg m^{-3});

${}^{\circ}B$ = concentração de sólidos solúveis (°Brix) ;

T_{abs} = temperatura absoluta (K).

CONSTENLA, LOZANO e CRAPISTE (1989) obtiveram correlações empíricas para prever a densidade de suco de maçã clarificado, a temperaturas entre 20°C a 80°C e 12° a 68,5 °Brix, observando forte dependência entre densidade e sólidos solúveis e visível decréscimo da densidade com o aumento da temperatura. O suco clarificado de maçã possui diferentes quantidades de açúcares dissolvidos (glicose, frutose e sacarose), sais e ácidos orgânicos. Os autores concluíram que a densidade do suco de maçã clarificado pode ser comparada à de

soluções de açúcares, pois a diferença entre elas foi de 1%. A equação 5, que relaciona a densidade (ρ) com o volume específico (V) de cada componente da solução, pode ser aplicada para qualquer suco de fruta, desde que se leve em conta a correção da acidez no refratômetro.

$$V = 1/\rho = \sum W_i V_i \quad \text{Eq. 5}$$

onde:

W_i = fração mássica parcial do i-componente na solução (adimensional);

V_i = volume específico parcial do i-componente na solução (adimensional).

A equação 6, para suco clarificado de maçã, relaciona a densidade (ρ) em função da temperatura absoluta e do grau Brix, com coeficiente de correlação igual a 0,9978 e desvio padrão de 0,0040.

$$\rho = 0,82780 + 0,34708 \cdot \exp(0,01^\circ B) - 5,479 \times 10^{-4} T_{abs} \quad \text{Eq. 6}$$

onde:

ρ = densidade (g cm^{-3});

$^\circ B$ = concentração de sólidos solúveis ($^\circ\text{Brix}$);

T_{abs} = temperatura absoluta (K).

A equação 7, também desenvolvida pelos mesmos autores, para suco clarificado de maçã, permite o cálculo da densidade de amostra (ρ) em função da densidade da água, a uma determinada temperatura, e do grau Brix, com coeficiente de correlação igual a 0,9989 e desvio padrão de 0,0021.

$$\rho = \rho_w / (0,992417 - 3,739 \times 10^{-3} ^\circ B) \quad \text{Eq. 7}$$

onde:

ρ = densidade (g cm^{-3});

ρ_w = densidade da água (g cm^{-3});

$^{\circ}B$ = concentração de sólidos solúveis ($^{\circ}$ Brix) ;

PEREIRA, QUEIROZ e FIGUEIRÊDO (2002) observaram, em amostras de polpa de açaí, a dependência da densidade em relação à concentração dos sólidos totais e o seu decréscimo com o aumento da temperatura. Propuseram uma equação para o cálculo teórico da densidade de polpa de açaí em função da temperatura e do teor de umidade da amostra (Equação 8), apresentando coeficiente de correlação de 0,9778 e desvio médio de 0,11%.

$$\rho = 1068,65 - 0,4579X_w - 0,3867T \quad \text{Eq. 8}$$

onde:

ρ = densidade (kg m^{-3});

X_w = concentração de umidade (adimensional);

T = temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

3.1.2. Teor de Umidade

O teor de umidade é a quantidade de água existente em um produto e pode ser expresso em base úmida ou em base seca.

O conhecimento do teor de umidade de alimentos é essencial para se determinar o tempo de conservação de cada produto. Esta variável é o principal fator para o controle do desenvolvimento de processos microbiológicos, além de afetar diretamente a textura dos alimentos.

Em substâncias sólidas existem, basicamente, dois tipos de água: um, denominado de água livre, é aquela fracamente ligada ao substrato, e que funciona como solvente, permitindo o crescimento dos microorganismos e a ocorrência de reações químicas, e que é eliminada com relativa facilidade. Outro, a água combinada, fortemente ligada ao substrato, mais difícil de ser eliminada e não utilizável como solvente e, portanto, não permite o desenvolvimento de microorganismos e retarda as reações químicas.

O constituinte de maior massa da grande maioria de frutas e hortaliças, o teor de umidade, varia entre 70% a 95%, é o fator mais influente nas propriedades termofísicas, motivo de sua determinação ser essencial.

A maioria dos valores de calor específico de alimentos apresentada na literatura é baseada na umidade do produto, o maior constituinte.

ALVARADO (1991), sugeriu a equação (33) para o cálculo do calor específico, em função do teor de umidade na faixa de 1% a 96% para ser usada para sucos e polpas de frutas.

TELIS-ROMERO et al. (1998) mostraram através das equações (13) e (29) a forte influência da umidade na condutividade e difusividade térmica em suco clarificado de laranja.

E ainda PEREIRA, QUEIROZ e FIGUEIRÊDO (2002), observaram a forte influência da umidade nos valores da densidade em polpa de açaí, mostrada na equação 8.

3.1.3. Concentração de Sólidos Solúveis

A concentração de sólidos solúveis em uma solução, conhecido como °Brix, é bastante utilizada na determinação do grau de maturação de frutas, onde predominam açúcares.

Os métodos de determinação do °Brix são sempre indiretos, através de medidas de densidade ou do índice de refração de substâncias.

ALVARADO e ROMERO (1989) observaram a dependência da densidade com o °Brix em sucos e polpas de frutas entre 5 a 30°Brix, como pode ser visto na equação 2.

Segundo COSTENLA, LOZANO e CRAPISTE (1989) a equação (17) relaciona a condutividade térmica com o °Brix e temperatura e a equação (36), calor específico com o °Brix e temperatura, para suco de maçã clarificado.

3.1.4. Condutividade Térmica

A Lei de Fourier define uma importante propriedade dos materiais, a condutividade térmica (k).

O estudo analítico da transmissão de calor, proposto pelo cientista francês Fourier, em 1822, descreve que um gradiente de temperatura, (dT/dx) , distribuído ao longo de duas superfícies, gera um fluxo de calor por unidade de área, diretamente proporcional ao gradiente, definindo a constante de proporcionalidade (k), conhecida como condutividade térmica. A primeira Lei de Fourier pode ser expressa como:

$$Q = -k.A.\frac{dT}{dx} \quad \text{Eq. 9}$$

onde:

Q = taxa de transferência de calor;

k = condutividade térmica;

A = área de transferência de calor;

$\frac{dT}{dx}$ = gradiente de temperatura.

O sinal negativo da equação indica que o calor é transmitido em sentido decrescente ao gradiente de temperatura. Portanto, a condutividade térmica inserida nesse contexto é uma propriedade do material, que descreve a taxa em que o fluxo de calor passa através deste, sob influência de um gradiente térmico (NUNES et al., 2002).

Valores de condutividade térmica e difusividade térmica variam com a composição química, estrutura física, temperatura e estado da matéria. No caso de materiais biológicos, a temperatura é menos influente na condutividade térmica que a estrutura celular, a densidade e a umidade, (MOHSENIN, 1980).

3.1.5. Difusividade Térmica

A difusividade térmica indica a variação da temperatura do material submetido a um processo de resfriamento ou aquecimento e é a mais utilizada em situações onde a transferência de calor ocorre em regime transiente. O significado físico da difusividade térmica está relacionado com a velocidade de propagação ou com a difusão do calor através do material. A difusividade térmica de um alimento depende da umidade, temperatura

composição e porosidade da amostra, (SINGH, 1982). A difusividade térmica está relacionada com a condutividade térmica, com a massa específica e com o calor específico do material e pode ser determinada através de uma aproximação geral da Equação de Fourier como mostra a equação 10:

$$\alpha = \frac{k}{\rho.C_p} \quad \text{Eq. 10}$$

onde:

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

k = condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

ρ = massa específica ou densidade (kg m^{-3});

C_p = calor específico ($\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$).

São apresentados na literatura, diferentes métodos para determinação de condutividade térmica e difusividade térmica. Esses métodos podem ser divididos em dois grupos: estacionários e transientes. Nos dois casos, a amostra é submetida a um fluxo de calor conhecido, em uma única direção, e a distribuição de temperatura é obtida através da Equação de Fourier (11):

$$\rho.C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad \text{Eq. 11}$$

onde:

ρ = densidade (kg m^{-3});

T = temperatura (°C);

C_p = calor específico da amostra ($\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

t = tempo (s);

x = coordenada retangular (m);

k = condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$).

Usando métodos estacionários, $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$, a equação (11) é reduzida a:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad \text{Eq. 12}$$

Isso significa que os métodos estacionários só podem ser usados para medir condutividade térmica, enquanto os métodos transientes podem ser usados para ambas propriedades: difusividade térmica e condutividade térmica, (SILVA, 1997).

3.2. MÉTODOS ESTACIONÁRIOS PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS

De acordo com MOHSENIN (1980), métodos de regime permanente ou métodos estacionários, são bastante usados para materiais biológicos com pouca umidade como pós, alimentos desidratados e materiais granulares como sementes e grãos.

Os métodos de estado estacionário podem ser divididos em: método das placas paralelas, método do cilindro concêntrico e método da esfera concêntrica. Estes três métodos requerem uma solução de equações de transferência de calor para um regime de estado estacionário em coordenadas retangulares, cilíndricas e esféricas, respectivamente.

“No método de estado estacionário, a temperatura constante é mantida em cada superfície da amostra. A razão constante de fluxo de calor, obtida após o equilíbrio, é medida para uma dada área seccional perpendicular ao fluxo e um gradiente de temperatura. Aplicando-se a primeira Lei de Fourier de transferência de calor, a condutividade média pode ser calculada. Devido a sua simplicidade, este foi um dos primeiros métodos a serem utilizados para materiais biológicos”, (FREIRE, 1981 citado por PARK, MURR e SALVADEGO, 1997).

“Todos os métodos clássicos baseiam-se na suposição de que as amostras do material são homogêneas e isotrópicas, de forma que quando um ponto da amostra é aquecido, o fluxo de calor é igual em todas as regiões. Obviamente, nos casos em que a amostra consiste de um número de partículas granulares, a condução de calor em certas direções é mais favorável que em outras e, portanto a amostra não é um sistema isotrópico”, (OTTEN, 1974 citado por PARK, MURR e SALVADEGO 1997). Outras desvantagens desse método são: longo tempo

para medição (podendo acarretar em migração de umidade da amostra), perdas de calor, dificuldade para dimensionar a amostra, que deve ter forma geométrica e ocorrência de erros para produtos com umidade superior a 10 % (FREIRE, KAZARIAN e HALL, 1965 citado por NUNES et al., 2002).

3.2.1. Métodos de Fluxo de Calor Longitudinal

LENTZ (1961) descreveu o uso do método de placas paralelas homogêneas para medir a condutividade térmica de carnes, gorduras, gelatina e gelo. O método de placas paralelas é baseado no regime permanente longitudinal para determinação da condutividade térmica, aplicando-se a lei de Fourier.

A amostra é colocada entre duas placas, uma quente (fonte de calor) e outra fria, ambas isoladas lateralmente. A condutividade térmica é determinada medindo-se o fluxo de calor através da amostra, pelo gradiente de temperatura formado. MOHSENIN (1980) mostrou que esse método é usado especialmente para alimentos secos e congelados, pois requer várias horas para que o sistema entre em estado estacionário, podendo, eventualmente, promover a migração de umidade dentro da amostra.

3.2.2. Métodos de Fluxo de Calor Radial

De acordo com MOHSENIN (1980), os métodos de fluxo de calor radial são usados para determinação da condutividade térmica de pós e materiais granulares, como sementes e grãos. No caso de cilindros concêntricos, a amostra é colocada entre eles e o calor é conduzido apenas no sentido radial. Os cilindros se mantêm a temperaturas constantes, sendo um a fonte de calor e o outro, a fonte fria. A condutividade térmica é determinada medindo-se o fluxo de calor radial através da amostra, pelo gradiente de temperatura.

TELIS-ROMERO et al. (1998) determinaram a condutividade térmica de suco de laranja não clarificado pelo método de cilindros coaxiais, desenvolvido por BELLET et al. (1975), em amplas faixas de temperatura e de umidade e propuseram a seguinte correlação:

$$k = 0,0797 + 0,5238X_w + 0,000580T \quad \text{Eq. 13}$$

onde:

k = condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

X_w = teor de umidade (%);

T = temperatura ($^\circ\text{C}$).

No caso de esferas concêntricas, um aquecedor localizado na cavidade da esfera interna, gera calor que é conduzido radialmente para o casco da esfera concêntrica externa. Os sensores de temperatura são mantidos nas paredes, próximos às superfícies internas e externas das esferas, a fim de determinar a diferença de temperatura através da amostra colocada no espaço entre elas.

3.3. MÉTODOS DE REGIME TRANSIENTE PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS

No método de regime transiente, a temperatura em um dado ponto da amostra submetida a um fluxo de calor, muda com o tempo, ou seja, (dT/dt) deve ser sempre diferente de zero.

O método tem uma grande vantagem, pois requer menor tempo de teste. Porém, medir a temperatura, localizar os termopares e a possível transferência de calor por convecção, são algumas dificuldades associadas ao método.

Entre os métodos de regime transiente, destacam-se o Método de Fitch, o Método da Fonte Linear de Aquecimento, o Método proposto por Dickerson e o Método das misturas, além do Método do Calorímetro Diferencial de Varredura, para determinação do calor específico.

3.3.1. Método de Fitch

De acordo com MOSHENIN (1980), o método de Fitch é um dos mais comuns para determinar a condutividade térmica de produtos de baixa condutividade.

O equipamento desenvolvido por Fitch em 1935, possui duas partes: uma fonte ou vaso contendo o líquido à temperatura constante e um tanque contendo uma peça de cobre isolada. A fonte é essencialmente um vaso pesado de cobre, isolado nos lados e aterrado, contendo um termopar. O tanque consiste de uma peça de cobre ligado a outro termopar. Uma fina camada de material (menor que um centímetro de espessura) é colocada entre o tanque e o vaso, para determinar a condutividade medida através da variação da temperatura com o tempo.

3.3.2. Método da Fonte Linear de Calor

O método da fonte linear de calor é utilizado para todos os tipos de alimentos: sólidos, como frutas e hortaliças *in natura*, carnes e queijos, grãos, cujos contornos são assumidos regulares (cilíndrico, cúbico ou esférico) e também líquidos, como sucos e polpas. No entanto, neste último caso, deve-se tomar precauções para que não ocorra convecção ao redor da sonda, ocasionada pela diferença de densidade que pode ser provocada pelo aumento da temperatura.

SWEAT (1995, citado por TANSAKUL e CHAISAWANG, 2006) recomenda a adição de 0,5% de agar na solução para se tornar um gel e evitar a possível convecção. É estimado que 0,5% de agar pode aumentar a condutividade térmica do alimento em torno de 2%.

Segundo SWEAT (1986), é um método simples e rápido e necessita de uma pequena quantidade de amostra. Porém necessita de um sistema de aquisição de dados bastante sofisticado. Este método foi descrito, em detalhes, por MOHSENIN (1980).

O método da sonda utiliza o princípio do método da fonte linear de calor, porém apresenta algumas modificações. A fonte linear gera um fluxo de calor constante em uma amostra de raio infinito, a qual deverá estar em equilíbrio térmico. Mede-se a elevação de

temperatura em algum ponto da amostra em um pequeno intervalo de tempo. Nestas condições, a temperatura em qualquer ponto do produto será função de uma série de variáveis incluindo tempo e condutividade térmica do material. A equação de transferência de calor aplicada será a equação de Fourier, onde o gradiente de temperatura é apenas radial.

Segundo MOHSENIN (1980), como a teoria é baseada assumindo que a fonte linear de calor é infinitamente comprida, e que o fio de aquecimento possui um raio infinitesimal, correções para uma sonda de diâmetro finito, um fluxo de calor axial e uma amostra de tamanho finito, devem ser levadas em consideração.

A condutividade térmica pode ser medida através da equação 14, que representa uma relação linear da temperatura versus tempo, em um papel semi-log, e a inclinação da reta igual a $\frac{Q}{4\pi k}$.

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{4\pi k} \cdot \ln(t_2/t_1) \quad \text{Eq. 14}$$

onde:

k = condutividade térmica da amostra ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

Q = calor gerado pela fonte de aquecimento (W m^{-1});

t_1 = tempo de início da medida da variação da temperatura (s);

t_2 = tempo final da medida da variação da temperatura (s);

T_1 = Temperatura da sonda no tempo t_1 ($^\circ\text{C}$);

T_2 = Temperatura da sonda no tempo t_2 ($^\circ\text{C}$).

É possível a determinação da difusividade térmica α , utilizando-se o método da fonte linear de calor. O equipamento para medir a condutividade térmica pode ser usado para medir a difusividade térmica, se um termopar adicional for colocado na amostra a uma distância radial conhecida. Quarenta termos da série que se segue devem ser avaliados para assegurar convergência para que $0,16 < \beta < 3,1$.

$$\Delta T = \frac{Q}{2\pi k} \left[\frac{-C}{2} - \ln \beta + \frac{\beta^2}{2 \times 1!} - \frac{\beta^4}{4 \times 2!} + \frac{\beta^6}{6 \times 3!} - \dots \right] \quad \text{Eq. 15}$$

$$\beta = \frac{r}{2\sqrt{\alpha t}} \quad \text{Eq. 16}$$

onde,

ΔT = elevação de temperatura de T_1 para T_2 (°C);

C = constante de Euler, 0,57721 (adimensional);

β = parâmetro adimensional;

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

t = tempo (s);

r = raio do termopar até a fonte de calor (m);

k = condutividade térmica da amostra ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

Q = calor gerado pela fonte de aquecimento (W m^{-1}).

CONSTENLA, LOZANO e CRAPISTE (1989) determinaram, pelo método da sonda, a condutividade de suco clarificado de maçã a diferentes temperaturas e concentrações. Para evitar o erro da possível convecção, 0,5% de goma xantana (espessante) foi adicionado ao suco. Observaram que a condutividade térmica do suco clarificado diminui linearmente com o aumento dos sólidos solúveis, característica comum de soluções de sacarose e sucos de frutas. Propuseram uma correlação linear em função da concentração e da temperatura, como é mostrada na Equação 17, onde k está em ($\text{W m}^{-1} \text{k}^{-1}$), com coeficiente de correlação de 0,9988 e desvio padrão de 0,0077. Esta correlação pode ser aplicada em processos de transferência de calor para diversos sucos de frutas.

$$k = 0,27928 - 3,5722 \times 10^{-3} \text{°} B + 1,1357 \times 10^{-3} T_{abs} \quad \text{Eq. 17}$$

onde:

k = condutividade térmica da amostra ($\text{W m}^{-1} \text{k}^{-1}$);

$\text{°} B$ = concentração de sólidos solúveis (°Brix);

T_{abs} = temperatura absoluta (K).

TANSAKUL e CHAISAWANG (2005) determinaram a condutividade térmica pelo método da sonda, de leite de coco com 20-35% de gordura em diferentes temperaturas (60, 70 e 80°C) obtendo valores para a condutividade térmica entre 0,425 e 0,590 ($\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$) e constataram que a influência da gordura é maior que a da temperatura na condutividade térmica. Os autores propuseram uma correlação, equação 18 para a determinação da condutividade térmica, em função da temperatura e da concentração de gordura do produto ($R=0,865$).

$$k = 0,654 - 0,942X_F + 0,002T \quad \text{Eq. 18}$$

onde:

X_F = fração mássica de gordura (adimensional);

k = condutividade térmica ($\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$);

T = temperatura (°C).

CARBONERA et al.(2003) determinaram a condutividade térmica para massa de tomate, com 18% de sólidos solúveis, pelo método da sonda quente, obtendo valores da ordem de 0,513 ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$).

SARRIA e HONÓRIO (2004) determinaram pelo método da sonda, simultaneamente, valores de condutividade e difusividade térmica entre 0,520 $\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ e $1,56 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente, do figo inteiro.

KUROZAWA et al (2005) determinaram a condutividade e a difusividade térmica de mamão papaya *in natura* em função da temperatura, pelo método da sonda, obtendo valores entre 0,580 a 0,620 $\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ e $1,03 \times 10^{-7}$ a $1,18 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente.

AZOUBEL et al., (2005) estudaram o efeito da concentração de sólidos solúveis, em propriedades físicas de sucos de caju e determinaram a condutividade e a difusividade térmica a 30°C, pelo método da sonda, obtendo valores entre 0,450 a 0,570 $\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ e $1,31 \times 10^{-7}$ a $1,43 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Os autores propuseram as equações 19 e 20 para os cálculos de condutividade e difusividade térmica, para sucos de caju, entre 5°-25°Brix, a 30°C, com coeficientes de correlação de 0,974 e 0,932, respectivamente.

$$k = 0,5994 - 6,0527 \times 10^{-3} B \quad \text{Eq. 19}$$

$$\alpha = 1,45751 \times 10^{-7} - 0,00558 \times 10^{-7} B \quad \text{Eq. 20}$$

onde:

k = condutividade térmica da amostra ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$);

$^{\circ}B$ = concentração de sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$);

α = difusividade térmica ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

SWEAT (1974, citado por MOHSENIN, 1980), propôs a equação 21 para a condutividade térmica em função da umidade. Esta equação pode ser usada para alimentos em geral, de umidades elevadas.

$$k = 0,00493X_w + 0,148 \quad \text{Eq. 21}$$

onde:

k = condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$);

X_w = teor de umidade (%).

RIEDEL (1949, citado por CHOI e OKOS, 1986), desenvolveu um modelo (equação 22) para determinação da condutividade térmica de sucos de frutas, leite e soluções de açúcares, com desvio médio de 1 %, na faixa de temperatura entre 0 – 80°C, em função da temperatura e do teor de umidade.

$$k = (326,58 + 1,0412T - 0,00337T^2) \cdot (0,46 + 0,54(X_w / 100)) \cdot 1,73 \times 10^{-3} \quad \text{Eq. 22}$$

onde:

k = condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$);

T = temperatura ($^{\circ}\text{C}$);

X_w = teor de umidade (%).

COMINI et al.(1974, citados por SWEAT, 1986) apresentaram, na equação 23, um modelo geral para o cálculo da condutividade térmica. Para verificar a precisão do modelo, foram testados 430 valores de umidade de uma grande variedade de alimentos, a aproximadamente 25°C.

$$k = 0,26 + 0,33(X_w / 100) \quad \text{Eq. 23}$$

onde:

k = condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$);

X_w = teor de umidade (%).

3.3.3. Método proposto por Dickerson

DICKERSON (1965) construiu um aparato experimental utilizando condições de transferência de calor em regime transiente, que necessita apenas dados de tempo e de temperatura para o cálculo da difusividade térmica de alimentos. O aparato consiste em uma cápsula metálica cilíndrica, de alta condutividade térmica, com suas extremidades isoladas, com termopares instalados na superfície externa e no centro do cilindro, conectados a um indicador de temperatura e um banho termostático com agitação. O equipamento mede a evolução da temperatura na superfície e no centro da amostra, durante determinado tempo. A cápsula é preenchida com a amostra e mergulhada no banho termostático, com agitação mecânica. As temperaturas são medidas até que uma taxa constante de seu aumento seja atingida nos dois termopares.

Sob condições de taxa constante de aumento de temperatura, como o gradiente de temperatura só existe no sentido radial, a equação de Fourier (24) fica assim representada:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \text{Eq. 24}$$

onde:

A = taxa constante de elevação de temperatura em todos os lados do cilindro ($^{\circ}\text{C s}^{-1}$);

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

t = tempo (s);

r = raio (m);

T = temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Como o gradiente $\frac{\partial T}{\partial r}$ não é dependente do tempo, a equação 24 pode ser escrita

como:

$$\left(\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{A}{\alpha} \quad \text{Eq. 25}$$

Para um cilindro de raio R , cuja temperatura da superfície é T_s , as condições de contorno usadas são:

$$T = At = T_s \quad (t > 0 ; r = R)$$

$$\frac{dT}{dr} = 0 \quad (t > 0 ; r = 0)$$

Aplicando as condições de contorno acima, temos a equação 26.

$$T_s - T_c = \frac{A}{4\alpha} (R^2 - r^2) \quad \text{Eq. 26}$$

Para $r = 0$, a equação 26 é transformada como apresentada na equação 27:

$$T_s - T_c = \frac{AR^2}{4\alpha} \quad \text{Eq. 27}$$

onde:

T_s = temperatura na superfície do cilindro ($^{\circ}\text{C}$);

T_c = temperatura no centro do cilindro ($^{\circ}\text{C}$);

A = taxa constante de aquecimento ($^{\circ}\text{C s}^{-1}$);

R = raio (m);

α = difusividade térmica ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

Portanto, conhecendo-se a taxa constante de aquecimento (A), o raio do cilindro R , e a diferença de temperaturas entre os dois termopares, que depois de um período transiente, se torna constante, não mais variando com o tempo, $(T_s - T_c)$, é possível determinar a difusividade térmica da amostra. Este experimento tem menor duração que os métodos estacionários, dependentes do alcance de equilíbrio.

Diversos autores utilizaram a metodologia de DICKERSON (1965), para determinação de polpas de frutas tropicais.

SOUSA et al.(2000), trabalhando com graviola, manga e pinha, com concentrações entre 3 e 17°Brix e umidades entre 71% e 93% obtiveram um modelo satisfatório para prever a difusividade térmica com $R = 0,933$ (Equação 28)

$$\alpha = 0,0204.X_w + 0,0878$$

Eq. 28

onde:

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

X_w = teor de umidade (%);

SILVA (1997), para polpa de abacaxi em duas concentrações (15 e 25°Brix), encontrou valores de $1,84 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$ e $1,74 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$, respectivamente.

SIMÕES (1997) determinou a difusividade de polpa de manga em quatro amostras: integral (12,7°Brix e malha = 1,8 mm), a peneirada (12,7°Brix e malha = 0,149 mm), a centrifugada (12,7°Brix) e a concentrada (30°Brix) e encontrou valores de $1,41 \times 10^{-7}$, $1,38 \times 10^{-7}$, $1,39 \times 10^{-7}$ e $1,28 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$, respectivamente. Verificou que a difusividade térmica não apresentou mudança significativa quando a concentração de sólidos insolúveis diminuiu, porém apresentou decréscimo, pelo aumento da concentração de sólidos solúveis (polpa concentrada).

MOURA et al.(2003)obtiveram bons resultados na determinação experimental do calor específico e da difusividade térmica, de soluções modelo similares a sucos, na faixa de temperatura de 10°C a 80°C, estudando a influência da composição química e da temperatura nas propriedades físicas dos produtos. As equações podem prever as propriedades termofísicas de sucos tropicais, sem a necessidade de medi-las experimentalmente, desde que conhecida a composição química do suco.

ARAÚJO et al. (2004) determinaram a difusividade térmica, pelo método de DICKERSON (1965), de polpa de cupuaçu com três concentrações de sólidos: integral (12°Brix), diluída (9°Brix) e com eliminação parcial dos sólidos insolúveis (peneirado), obtendo os seguintes valores: $1,31 \times 10^{-7}$, $1,32 \times 10^{-7}$ e $1,27 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$, respectivamente, e observaram que a difusividade não sofreu influência nas diferentes concentrações de sólidos.

LIMA et al. (2003) estudaram as propriedades termofísicas de polpa de umbu a 10, 20 e 30°Brix, apresentando valores de difusividade que variaram de $1,35 \times 10^{-7}$ a $1,52 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, decrescendo, em todas as amostras à medida que o teor de sólidos solúveis (°Brix) aumentou.

TELIS-ROMERO et al., (1998) determinaram a difusividade térmica de suco de laranja não clarificado, pelo método de DICKERSON, em amplas faixas de temperatura e de umidade, e propuseram a correlação apresentada na figura 29:

$$\alpha = 7,9683 \times 10^{-8} + 5,9839 \times 10^{-8} X_w + 0,02510 \times 10^{-8} T \quad \text{Eq. 29}$$

onde:

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

X_w = teor de umidade (%);

T = temperatura (°C).

RIEDEL (1969, citado por SINGH, 1982) mostrou, através da equação 30, que a difusividade térmica é fortemente dependente do teor de água para uma grande variedade de alimentos.

$$\alpha = 0,088 \times 10^{-6} + (\alpha_w - 0,088 \times 10^{-6}) X_w \quad \text{Eq. 30}$$

onde:

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

α_w = difusividade térmica da água ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$);

X_w = teor de umidade (%);

Através de uma regressão múltipla de 246 valores publicados de difusividade térmica de diversos alimentos, MARTENS (1980 citado por SINGH, 1982) concluiu que a temperatura e o teor de água são os fatores mais importantes que afetam a difusividade térmica. Sua equação de regressão é representada a seguir na equação 31:

$$\alpha = [0,057363 X_w + 0,000288(T + 273)] \times 10^{-6} \quad \text{Eq. 31}$$

onde:

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

X_w = teor de umidade (%);

T = temperatura (°C).

3.4. CALOR ESPECÍFICO

O calor específico de um material é a quantidade de calor ganho ou perdido, necessário para alterar a temperatura em um grau, em uma unidade de massa, sem mudança de estado. Nos processos de transferência de calor, a que são submetidos os materiais biológicos, a variação de pressão é muito pequena, Portanto, utiliza-se o conceito de calor específico à pressão constante, (MOHSENIN, 1980).

Uma compilação de dados relacionados a valores de calor específico se encontra no Refrigeration HandBook (ASHRAE, 1967), com valores abaixo e acima do ponto de congelamento, como também de calor latente de fusão para uma ampla variedade de alimentos. A maioria dos valores calculados é baseada na umidade do produto. É difícil verificar se os valores foram estimados por algum modelo, determinados experimentalmente, ou retirados da literatura (OHLSSON, 1983).

Teoricamente, o calor específico (C_p) de materiais compostos, como alimentos, pode ser determinado pela soma das capacidades caloríficas de cada componente. Os dois maiores componentes líquidos dos alimentos são a água e a gordura, considerado sólido, os demais. A equação 32, sugerida por MILES, VAN BEEK e VEERKAMP (1983) pode ser usada para estimar o calor específico de alimentos em geral:

$$C_p = (X_w + 0,5X_F + 0,3X_S) \times 4,18 (kJ kg^{-1} K^{-1}) \quad \text{Eq. 32}$$

onde:

X_w = fração mássica de água (adimensional);

X_F = fração mássica de gordura (adimensional);

X_S = fração mássica de sólidos (adimensional).

CHOI e OKOS (1986) desenvolveram um modelo para prever o calor específico de alimentos, baseado nas frações mássicas e propriedades dos principais componentes puros, como carboidrato, gordura, cinzas, água e proteína em função da temperatura.

Para sucos de frutas com teor de água acima de 50% as equações de DICKERSON (1969) e EARLE (1968), são amplamente usadas, (ALVARADO, 1991).

ALVARADO (1991) determinou o calor específico, pelo método das misturas, de trinta e um tipos de frutas, em diferentes teores de umidade e, através dos resultados experimentais, obteve equações lineares para cada fruta estudada. Para componentes com baixa umidade, uma equação exponencial se ajusta melhor aos valores experimentais, como está mostrado na equação 33. Esta pode ser usada para sucos de frutas, naturais ou concentrados, em uma faixa de 1-96% de teor de umidade, em temperaturas acima do congelamento e abaixo do ponto de ebulição.

$$C_p = 1,56e^{0,009446X_w} \quad \text{Eq. 33}$$

onde:

C_p = calor específico ($\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$);

X_w = teor de umidade (%);

e = logaritmo neperiano (adimensional).

3.4.1. Modelos Experimentais para o Cálculo do Calor Específico

Pode-se determinar o calor específico de materiais biológicos através de duas formas: estacionária e transiente, utilizando-se dois tipos de equipamentos: o Calorímetro de Mistura ou o Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC).

3.4.1.1. Método das Misturas

No método das misturas, o material, com massa e temperatura conhecidas, é mergulhado em um líquido inerte, também com massa e temperatura conhecidas, acondicionado, em um calorímetro adiabático de calor específico conhecido. A temperatura

de equilíbrio atingida é anotada. Para se determinar o calor específico do material, assume-se que o calor perdido pelo material é igual ao calor ganho pelo fluido e pelo calorímetro. Como o isolamento entre o calorímetro e a vizinhança nem sempre é perfeito, pode haver perda ou ganho de energia, através das paredes do sistema, e ganho pela agitação. Por este motivo, é aconselhável que se realize a calibração do instrumento, usando as mesmas condições da realização do ensaio. O balanço de calor é mostrado pela equação 34:

$$T_i C_{pc} M_c + T_i C_{pw} M_w + T_a C_{pa} M_a = (C_{pc} M_c + C_{pw} M_w + C_{pa} M_a) T_E \quad \text{Eq. 34}$$

onde:

T_a = temperatura da amostra (°C);

T_E = temperatura de equilíbrio (°C);

T_i = temperatura de inicial (água) (°C);

C_{pa} = calor específico da amostra ($\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

C_{pw} = calor específico da água ($\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

C_{pc} = capacidade térmica do calorímetro ($\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

M_a = massa da amostra (kg);

M_w = massa da água adicionada (kg);

M_c = massa do calorímetro (kg).

O método das misturas foi utilizado por SHRIVASTAVA e DATTA (1999), para determinar valores de calor específico de cogumelos (*Pleurotus florida*) durante o processo de secagem. Os autores encontraram valores entre 1,7158 e 3,9498 $\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$, para amostras com teores de umidade entre 10,24% e 89,68% e temperaturas variando de 40°C a 70°C.

RAPUSAS e DRISCOLL (1995) utilizaram o mesmo método durante o processo de secagem de fatias de cebola, obtendo valores de calor específico entre 1,82 e 3,45 $\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ com teores de umidade entre 0,0 e 69,2%.

Tanto SHRIVASTAVA e DATTA (1999) como RAPUSAS e DRISCOLL (1995) observaram correlações lineares diretas entre o calor específico e a umidade.

SOUSA et al. (2000) também chegaram a correlações lineares para polpas de frutas tropicais (manga, graviola e pinha) e apresentaram a equação 35, para teores de umidade entre 76% a 95%:

$$C_p = 0,0688X_w - 2,6263 \quad \text{Eq. 35}$$

onde:

C_p = calor específico ($\text{kJ kg}^{-1}\text{C}^{-1}$);

X_w = teor de umidade (%).

MATA e DUARTE (2003) e DUARTE, MATA e PAIVA (2003) trabalharam com temperaturas criogênicas na determinação dos calores específicos de cajá e da mangaba, respectivamente, concluindo de que o calor específico aumenta com o aumento da temperatura.

ARAÚJO, QUEIROZ e FIGUEIREDO (2004) determinaram valores de calor específico de polpas de cupuaçu integral (12°Brix), diluída (9°Brix) e peneirada de 3,24 $\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$, 3,71 $\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ e 3,18 $\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$, respectivamente. LIMA, QUEIROZ e FIGUEIREDO (2003) obtiveram valores de calor específico experimentais de polpa de umbu a 10, 20 e 30°Brix, de 3,67 $\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$, 3,48 $\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ e 3,21 $\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ respectivamente. Os dois últimos trabalhos citados foram feitos acima do ponto de congelamento e foi observado que em uma mesma temperatura, existe uma relação inversa entre o calor específico e a concentração de sólidos solúveis totais.

3.4.1.2. Método do Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC)

Neste método, a quantidade de energia necessária para variar a temperatura da amostra é comparada com a energia necessária para mudar a temperatura de um material de referência, sob a mesma taxa de aquecimento. O calor requerido para atingir a temperatura é gravado em um termograma, que registra o histórico do fluxo de calor relacionado com a

temperatura. No Calorímetro Diferencial de Varredura, a quantidade da amostra utilizada é muito pequena (miligramas) e a amostra precisa estar homogeneizada. Resultados mais exatos são obtidos através de médias de replicatas, (OHLSSON, 1983).

No suco clarificado de maçã, CONSTENLA, LOZANO e CRAPISTE (1989), usando o método do DSC, verificaram um decréscimo linear do calor específico em função do aumento da concentração de sólidos solúveis (6-75°Brix), e a relação inversa com a temperatura (30-90°C), para mesma concentração de sólidos solúveis,. Os autores sugeriram a equação 36 para estimar o calor específico de sucos de frutas em função da concentração e temperatura:

$$C_p = 0,80839 - 4,3416 \times 10^{-3} B + 5,6063 \times 10^{-4} T \quad \text{Eq. 36}$$

onde:

C_p = calor específico (cal g⁻¹°C⁻¹);

B = concentração de sólidos solúveis (°Brix);

T = temperatura (°C).

ZAINAL et al. (2000) determinaram o calor específico (C_p) de suco de goiaba vermelha, em duas concentrações (9°Brix e 11°Brix), pelo método DSC, chegando a duas correlações em função da temperatura (T), entre 65°C e 85°C, mostradas nas equações 37 e 38. Os valores de calor específico variaram de 3525,65 a 3583,16 J kg⁻¹ °C⁻¹.

$$C_p = 3366,1 + 2,5536T \quad \text{J kg}^{-1} \text{ °C}^{-1} \text{ (para amostras com 9°Brix)} \quad \text{Eq. 37}$$

$$C_p = 3473,2 + 0,807T \quad \text{J kg}^{-1} \text{ °C}^{-1} \text{ (para amostras com 11°Brix)} \quad \text{Eq. 38}$$

TANSAKUL e CHAISAWANG (2006) determinaram o calor específico de leite de coco, entre 20-35% de gordura, e temperaturas entre 60-80°C, pelo método do DSC e obtiveram valores entre 3,277 kJ kg⁻¹ °C⁻¹ e 3,711 kJ kg⁻¹ °C⁻¹, observando uma correlação

linear inversa entre o calor específico e o teor de gordura, ou seja, à medida que o teor de gordura diminui, aumenta o valor do calor específico.

De acordo com diversos autores, quando a fração de um componente da amostra diminui, aumentam as frações dos demais. Assim, diminuindo a fração de gordura, aumenta a fração de água, e por ela ser o componente que exerce a maior influência no valor do calor específico, este vai mudar em função desse aumento.

3.5. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Através da revisão bibliográfica realizada, observou-se que os métodos mais utilizados para a determinação de propriedades termofísicas de frutas e hortaliças são:

- **Densidade:** Método da Picnômetro, para determinação de líquidos e Método do Princípio de Arquimedes, para produtos inteiros. Equações e correlações, obtidas através de dados experimentais também são muito utilizadas.
- **Difusividade térmica:** Métodos de Regime Transiente são os mais utilizados, dentre eles: o da Fonte Linear de Calor, que pode determinar simultaneamente a condutividade e difusividade térmicas, e o proposto por Dickerson. O método da Fonte Linear de Calor é mais utilizado para sólidos e o de Dickerson para líquidos
- **Calor Específico:** Os Métodos de Regime Transiente mais utilizados são o das Misturas e o do Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC).
- **Condutividade térmica:** O método mais utilizado é o da Fonte Linear de Calor, é de regime transiente. Além deste método, a condutividade térmica pode ser determinada indiretamente, pela aproximação geral da Equação de Fourier, quando as outras três propriedades térmicas (calor específico, difusividade térmica, e densidade), são determinadas experimentalmente.

A revisão de literatura realizada tornou evidente a inexistência de valores de propriedades termofísicas de alguns produtos. A maior parte das informações compiladas provém de artigos internacionais.

Das hortaliças produzidas no Brasil, já foram determinados alguns valores para batata, tomate, cebola, cenoura, nabo, pepino e beterraba, porém o conjunto de todas as propriedades ainda está incompleto. Há falta de valores de propriedades termofísicas de produtos hortícolas como: berinjela, ervilhas, alho, batata doce, inhame, mandioca, chuchu, pimentão, abóbora, brócolis, couve-flor, rabanete, repolho, entre outros.

Das frutas produzidas no Brasil, encontraram-se trabalhos sobre manga, laranja, mamão, figo, açaí, cajá, graviola, pinha, cupuaçu, mangaba e umbu, porém, em alguns casos, apenas uma propriedade foi determinada. Nos artigos internacionais, foram encontrados dados das propriedades de: banana, abacaxi, maracujá (só a densidade), melancia, uva, maçã, pêsego, nectarina, limão, tangerina, melão, goiaba, abacate, morango, pêra, amora, carambola e ameixa. Ainda são desconhecidos os valores de propriedades termofísicas para frutas como: acerola, caju, maracujá, caqui, cacau, cirigüela, jaca, kiwi, jabuticaba, etc.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento experimental deste trabalho foi realizado no Laboratório de Engenharia de Sistemas Agroalimentares, localizado na Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA), na Universidade Estadual de Campinas.

4.1. MATERIAL

A escolha de produtos hortícolas para determinação das propriedades termofísicas dependeu da inexistência ou carência de dados disponíveis nas fontes bibliográficas consultadas. Os produtos hortícolas foram adquiridos na Central de Abastecimento de Campinas. As polpas de fruta foram elaboradas nas dependências do Laboratório de Engenharia de Sistemas Agroalimentares na faculdade de Engenharia de Alimentos. As frutas e hortaliças escolhidas para as determinações experimentais, são citadas a seguir.

4.1.1. Frutas

- Maracujá (*Passiflora edulis f. flavicarpa*)
- Tangerina ponkã (*Citrus reticulata*)
- Graviola (*Annona muricata L.*)
- Caju (*Anacardium occidentale L.*)
- Acerola (*Malpighia glabra L.*)
- Banana nanica (*Musa acuminata Colla x Musa balbisiana Colla*, grupo AAA))
- Mamão formosa (*Carica papaya L.*)
- Manga Tommy Atkins (*Mangifera indica L.*)

4.1.2. Hortaliças

- Abóbora menina brasileira (*Curcubita moschata*)
- Berinjela (*Solanum melongena L.*)
- Cebola (*Allium cepa L.*)
- Chuchu (*Sechium edule*)

4.1.3. Equipamentos acessórios e outros materiais

- Facas
- Peneiras de cozinha
- Liquidificadores
- Mixer
- Sistema kitasato
- Bomba a vácuo
- Sacos de polietileno de baixa densidade
- Picnômetros de 25 mL de capacidade
- Balança analítica marca Sartorius, modelo, BP 2215
- Refratômetro de bancada marca Anova, tipo Abbe, modelo, 2WAJ
- Estufa a pressão atmosférica com circulação, marca Fanem, modelo, 320-SE
- Estufa a vácuo marca, Tecnal, modelo, TE395
- Aparato de cobre com termopares
- Banho termostático com agitador mecânico, marca Optherm e modelo DC-5 de 10 litros de capacidade
- Termômetro
- Sistema de aquisição de dados (Lynx versão 7.2.1)
- Sonda para medição de condutividade térmica
- Copo cilíndrico
- Calorímetro de mistura
- Água destilada
- Glicerina
- Agar (espessante)

4.2. MÉTODOS

A metodologia foi dividida em duas partes que serão apresentadas em fluxogramas diferentes. O primeiro fluxograma representa a metodologia utilizada para a obtenção das polpas de frutas (maracujá, tangerina, graviola, caju e acerola). As propriedades determinadas experimentalmente foram: teor de umidade, densidade, teor de sólidos solúveis (°Brix),

difusividade térmica e calor específico, todas realizadas em triplicata. Com esses valores, determinou-se indiretamente, através da aproximação geral da Equação de Fourier, o valor da condutividade térmica das polpas de frutas. O método está resumido no fluxograma apresentado na Figura 1 e será explicado em etapas.

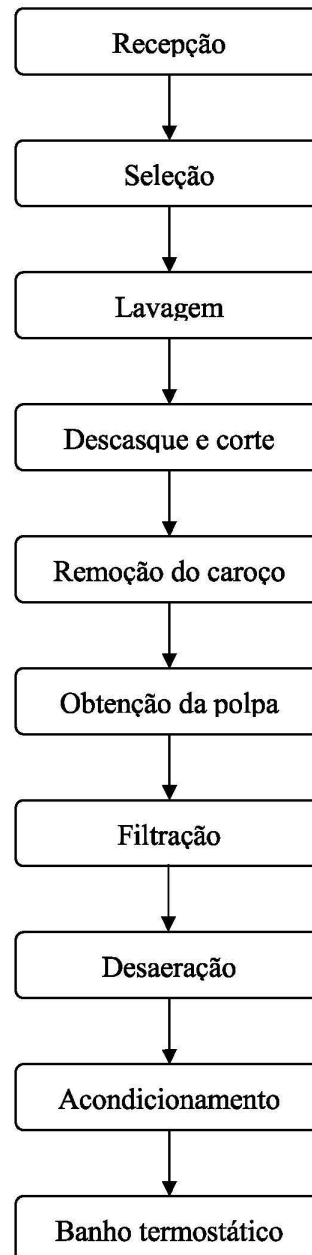


Figura 1. Fluxograma para preparo das amostras das polpas de frutas

Após a recepção, as amostras foram selecionadas (livres de ferimentos e doenças e grau de maturação adequado ao consumo). Foram feitas lavagens com detergente neutro e com água clorada a 5 mg/L, enxaguadas e secadas com papel toalha. As amostras foram descascadas e fatiadas. Para a obtenção das polpas foram utilizados equipamentos, como liquidificadores, processadores, espremedores e mixers, que homogeneízam a amostra. Houve a necessidade de remoção das sementes antes da obtenção da polpa para algumas amostras e outras foram passadas por peneiras de cozinha para a retirada das sementes. A quantidade de polpa necessária para cada experimento foi de 500 mL.

As amostras foram desaeradas sob baixa pressão, em frasco de kitasato conectado a uma bomba de vácuo. Posteriormente foram acondicionadas em sacos plásticos de polietileno de baixa densidade, com volume de aproximadamente 80 mL, seladas e mantidas a uma temperatura constante (30°C), em banho termostático (aproximadamente 30 minutos) até o início do experimento. Este valor de temperatura (30°C), foi escolhido por ser a média máxima dos dias mais quentes no ano, na região de Campinas, Estado de São Paulo. (CEPAGRI, 2006).

O segundo fluxograma representa a metodologia utilizada para as análises de frutas e hortaliças *in natura* (abóbora, berinjela, cebola, chuchu, banana, caju, mamão e manga) e as propriedades determinadas foram: teor de umidade, teor de sólidos solúveis (somente para frutas), e condutividade térmica.

As análises do teor de umidade e teor de sólidos solúveis foram realizadas em triplicata.

Para a determinação da condutividade térmica, as amostras foram limpas, cortadas transversalmente, para inserção da sonda em ângulo de 90° na superfície da amostra. A relação comprimento / diâmetro foi maior ou igual a 4, para assegurar o fluxo de calor apenas na direção radial. O local de inserção da sonda foi escolhido tomando-se o cuidado para que nenhuma parte da sonda ficasse em contato com a semente central das amostras. O número de repetições variou por amostra, abóbora (12), berinjela (13), cebola (12), chuchu (14), banana (9 - 1º ensaio) e (5 - 2º ensaio), caju (10), mamão (6 - 1º ensaio) e (12 - 2º ensaio), manga (12), este número variou em função das dispersões dos resultados. O método está resumido no fluxograma apresentado na figura 2.

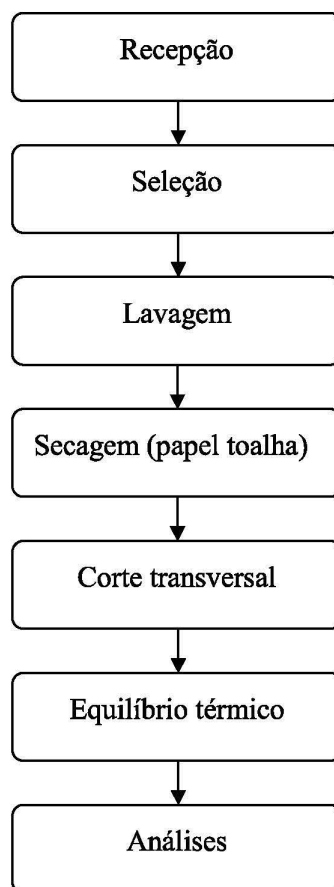


Figura 2 .Fluxograma para preparo das frutas e hortaliças *in natura*.

4.2.1. Densidade

A densidade foi determinada através do método número 4.4 descrito pela AOAC (1984). A densidade foi medida na temperatura pré-estabelecida (30°C), utilizando-se picnômetros de 25 mL de capacidade. Inicialmente, os picnômetros foram calibrados, na temperatura pré-estabelecida. O picnômetro, com massa e volume conhecidos, foi preenchido com água destilada e pesado. A massa de água destilada dividida pelo volume ocupado por ela, permitiu a calibração do equipamento, conhecendo-se a densidade da água destilada a

30°C. Os picnômetros foram lavados, secos e tarados. A seguir, foram preenchidos com as amostras de polpas de maracujá, caju, tangerina ponkã, graviola e acerola, na temperatura pré-estabelecida, e pesados em balança analítica marca Sartorius, modelo, BP 2215, com precisão de 0,0001 g. A densidade da amostra foi calculada pela razão entre sua massa e seu volume determinado no picnômetro.

4.2.2. Sólidos solúveis

Inicialmente as amostras de polpas de maracujá, caju, tangerina ponkã, graviola e acerola, foram transferidas de uma a duas gotas para o prisma do refratômetro, desprezando as partículas grandes da polpa. A concentração dos sólidos solúveis (°Brix) foi determinada em refratômetro de bancada (marca ANOVA, tipo Abbe, Modelo, 2WAJ) a 30°C.

4.2.3. Teor de umidade

Os teores de umidade foram determinados para todas as amostras através de uma pré-secagem, seguida do método descrito pela AOAC (1984) número 22.013, para frutas desidratadas. Inicialmente, uma massa conhecida da amostra foi aquecida em estufa a 60°C, por 4 horas, com circulação mecânica à pressão atmosférica (marca, Fanem, modelo:320-SE), resfriada e pesada. Após a pré-secagem, a amostra permaneceu durante 6 horas a 70°C em estufa a vácuo (marca, Tecnal, modelo, TE395) antes de ser novamente resfriada e pesada.



Figura 3. Estufa a vácuo, para determinação da umidade de frutas e hortaliças. (Laboratório de Engenharia de Sistemas Agroalimentares, Faculdade de Engenharia de Alimentos/UNICAMP).

4.2.4. Difusividade Térmica

A difusividade térmica foi determinada para as amostras de polpas de frutas citadas anteriormente, com o auxílio de aparato semelhante ao usado por DICKERSON (1965). O aparato é constituído basicamente por uma cápsula cilíndrica de cobre isolada em suas extremidades, com dois termopares localizados um no centro e outro na superfície do cilindro (Figura 4), um indicador de temperatura, um banho termostático e um agitador mecânico (Figura 5).

O diâmetro interno do tubo é de 50,8 mm e a altura livre entre as tampas, na posição fechada, é de 234,5 mm. Devido aos requisitos combinados de elevada condutividade térmica e rigidez, a cápsula cilíndrica é feita de cobre. As tampas são de nylon, com difusividade térmica de $1,09 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, próxima à difusividade de alimentos em geral. Um termopar com isolamento mineral, tipo “T”, simples, bainha em aço inox 316, diâmetro de 1,5 mm, fixado na superfície exterior do cilindro, fornece a temperatura da amostra na posição de raio = R. Os termopares serão previamente calibrados em banho térmico, usando termômetros padrões, para dois níveis de temperatura. Uma sonda com termopar no eixo do cilindro mede a

temperatura no centro da amostra ($r = 0$). O procedimento de montagem consiste em colocar a tampa inferior, encher o tubo com a amostra e colocar a tampa superior. A seguir a sonda é inserida, com total imersão do sensor na amostra, com fixação na tampa superior, que assegura um adequado posicionamento radial do termopar central. O conjunto todo é colocado em um banho de temperatura constante (25°C), bem agitado e isolado termicamente. O banho térmico, marca Optherm e modelo DC-5 com capacidade volumétrica de 10 litros de água (Figura 6), é aquecido a uma taxa constante, satisfazendo ao requisito de dT/dt em torno de $1,00^{\circ}\text{C} / \text{min}$.

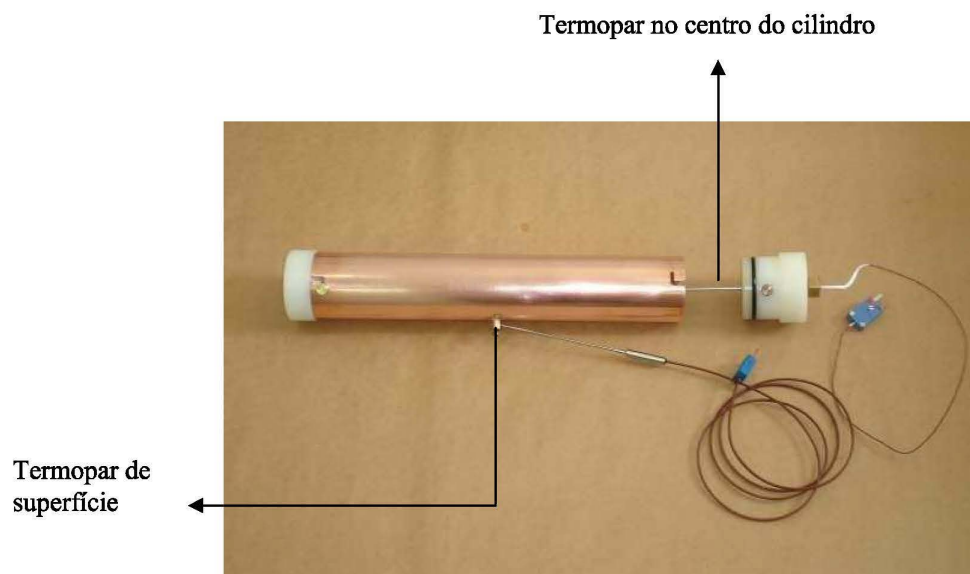


Figura 4. Cápsula cilíndrica de cobre com termopares. (Laboratório de Engenharia de Sistemas Agroalimentares – Faculdade de Engenharia de Alimentos/UNICAMP).

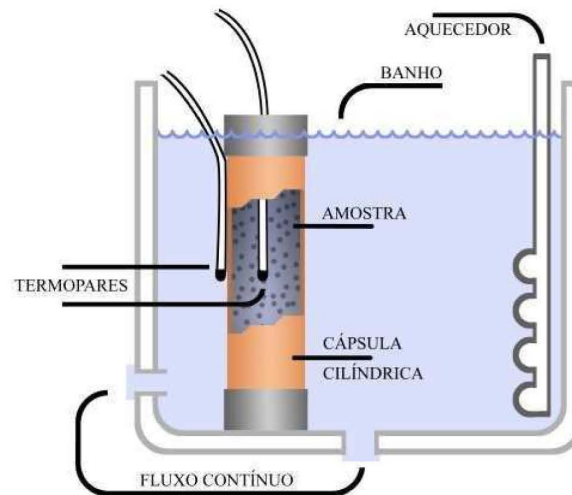


Figura 5. Esquema da metodologia usada para determinação da difusividade térmica.



Figura 6. Banho termostático com cápsula metálica. (Laboratório de Engenharia de Sistemas Agroalimentares – Faculdade de Engenharia de Alimentos/UNICAMP).

No momento em que o banho térmico é ligado, o sistema de aquisição de dados registra a evolução da temperatura com o tempo, com sensibilidade de centésimos, para ambas grandezas. No tempo zero, as temperaturas dos dois termopares são iguais, mas vão se

modificando à medida que a temperatura do banho aumenta, até atingirem uma diferença de temperatura constante. Após a eliminação da maior parte do regime transiente, a taxa constante de aquecimento é obtida pelo coeficiente angular, no gráfico de temperatura versus tempo, realizado com os dados experimentais. A diferença das temperaturas entre a superfície e o centro da amostra ($T_s - T_c$) é obtida quando as duas curvas se tornam paralelas. A difusividade térmica foi determinada através da equação 39, proposta por DICKERSON (1965):

$$T_s - T_c = \frac{AR^2}{4\alpha} \quad \text{Eq. 39}$$

4.2.5. Condutividade Térmica

4.2.5.1 Aproximação geral da Equação de Fourier

A determinação da condutividade térmica das polpas de maracujá, tangerina, graviola, caju e acerola foi calculada através da equação que relaciona a difusividade térmica, o calor específico, a densidade e a condutividade térmica:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad \text{Eq. 40}$$

4.2.5.2 Fonte Linear de Calor

Para as hortaliças: abóbora, berinjela, cebola e chuchu e as frutas: banana, caju, mamão e manga, a condutividade térmica foi determinada pelo Método da Fonte Linear de Calor (Sonda).

A amostra foi preparada para que ficasse na forma cilíndrica, respeitando a relação indicada entre o comprimento e o diâmetro, (igual ou maior a quatro vezes o diâmetro), ou a amostra ser maior do que esta relação para assegurar que o fluxo de calor seja apenas na direção radial.

A sonda utilizada para esse experimento (Figura 7) consiste de uma fonte de calor linear (fio de níquel-cromo), inserida em uma agulha hipodérmica (diâmetro de 2,3mm) e de um termopar situado a meio-caminho, ao longo da agulha.

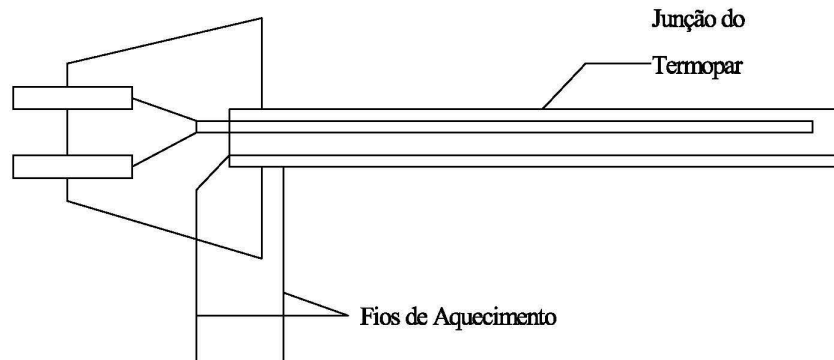


Figura 7. Esquema da sonda de condutividade térmica.

Em regime transiente o material fica submetido a uma corrente elétrica que, atravessando um fio de resistência, provoca a geração de calor. Esta produção constante de calor no fio provoca, num corpo cilíndrico, uma variação de temperatura que depende das propriedades termofísicas do material, como a condutividade térmica.

A vantagem de escolher um corpo de prova cilíndrico reside no fato de assegurar o fluxo de calor radial, permitindo um tratamento matemático como tal. A solução simplificada da equação (41), adota a hipótese da fonte de calor linear ter comprimento infinito e espessura desprezível, com as condições de contorno iniciais passando a serem dadas pela equação (42):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \text{Eq. 41}$$

$$t = 0 ; r \neq 0 \quad (T = 0)$$

$$t > 0 ; r = \infty \quad (T = 0)$$

$$t > 0 \quad ; \quad r \rightarrow 0 \quad \left(-2\pi r k \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = Q' \right)$$

$$T - T_0 = \left(\frac{Q'}{4\pi k} \right) \left[-5,772 - \ln \frac{r}{4\alpha t} + \frac{r^2}{4\alpha t} \right] \quad \text{Eq. 42}$$

onde:

Q' = taxa de aquecimento por metro do fio aquecedor (Wm^{-1});

0,5772 = Constante de Euler (adimensional);

T_0 = temperatura inicial ($^{\circ}\text{C}$);

α = difusividade térmica (m^2s^{-1}).

Como o termo $(r^2/4\alpha t)$ é muito pequeno, a equação pode ser ainda mais simplificada. Após um período de aquecimento, o traçado de $\ln(t)$ versus T (temperatura) produzirá uma linha reta. Para dois tempos diferentes no trecho linear da curva, é válida a seguinte relação:

$$T_2 - T_1 = \left(\frac{CQ'}{4\pi k} \right) \cdot \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad \text{Eq. 43}$$

Rearranjando a equação pode-se obter expressões para a constante da sonda C , ou para a condutividade térmica k .

$$k = C \cdot \underbrace{\frac{Q'}{4\pi} \cdot \left(\frac{\ln(t_2/t_1)}{T_2 - T_1} \right)}_{k'} \quad \text{Eq. 44}$$

onde:

C = constante de calibração da sonda (fator de correção);

Q' = taxa constante de aquecimento por metro do fio aquecedor (Wm^{-1});

$\frac{T_2 - T_1}{\ln(t_2/t_1)}$ = coeficiente angular da reta;

k = condutividade térmica experimental corrigida ($\text{W m}^{-1}\text{C}^{-1}$);

k' = condutividade térmica experimental ($\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$).

Para se determinar a constante da sonda C , um copo cilíndrico (diâmetro igual a 2,9 cm e altura de 12 cm) foi preenchido com substâncias de condutividade conhecida: glicerina a 20°C ($k = 0,284 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$) e solução de 0,4% de agar em água destilada, com aproximadamente $k = 0,608 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, a 23°C.

Foram feitos diversos ensaios com glicerina e solução aquosa de agar 0,4%, a diferentes temperaturas e seus valores foram corrigidos para cada temperatura determinada. A relação entre as condutividades real e a experimental, foi o fator de correção usado ($C =$ constante da sonda). Nova calibração para a sonda foi realizada antes de qualquer ensaio experimental com produtos hortícolas.

Os valores de T_1 , T_2 , (temperaturas) e t_1 , t_2 (tempo) foram obtidos plotando $\ln(t)$ versus T , a partir dos dados experimentais. O sistema experimental consistiu de uma fonte de tensão estabilizada (que induz determinada corrente ao fio de aquecimento), amperímetro ligado à fonte de tensão (para registrar a corrente), indicador de temperatura, resistência de teste e chave seletora que transfere a corrente induzida da resistência de teste para o fio de aquecimento. Conhecidas a diferença de potencial U e a corrente i , pode-se determinar a potência ou o trabalho que a corrente realiza na amostra. ($P=U.i$).

O fio de aquecimento é de níquel-cromo fino e de alta resistência, junto a um termopar de cobre-constantan (tipo T), com isolante térmico e elétrico, gerando a sonda. A sonda consistiu de uma haste tubular de metal, com alta condutividade térmica, no interior da qual é introduzido o fio de aquecimento (comprimento igual a 0,066 m) e o termopar de dimensões capilares, isolados. Um fio de aquecimento foi conectado à extremidade da sonda através de solda, que também sela esta extremidade, e o outro, soldado na haste bem próximo ao cabo da sonda. A junção do termopar ficou localizada no centro, ao longo do comprimento da sonda.

Como o tratamento matemático baseia-se na teoria de fluxo de calor em cilindros infinitos, o fato de se utilizar amostras com tamanho finito, pode causar erros. Se o corpo de prova é bem grande, o campo de temperatura não atinge a extremidade durante o teste e ele será efetivamente infinito. Assim, pode-se minimizar o erro diminuindo o tempo de teste e aumentando o diâmetro da amostra. Para assegurar apenas fluxo de calor radial, o corpo de

prova deve ter um comprimento maior ou igual a quatro vezes o seu diâmetro. Assim, o fluxo de calor na direção axial será desprezível.

O teste experimental consistiu em introduzir a sonda na amostra (observando as condições necessárias ao fluxo de calor unidimensional), em temperatura uniforme, e aguardar atingir o estado de equilíbrio. Em seguida, aplicou-se uma corrente elétrica constante ao fio de aquecimento e registrou-se a temperatura da sonda a cada segundo, durante aproximadamente um minuto. Com os dados da temperatura e tempo, pôde-se construir o gráfico e calcular a condutividade térmica. No caso de medições com a sonda, é possível considerar discrepâncias entre a teoria e a prática através do fator de calibração C , obtido com um material de condutividade térmica conhecida.

4.2.6. Calor Específico

Para se determinar o calor específico (C_p), das polpas de maracujá, caju, tangerina, graviola e acerola, foi usado um Calorímetro Adiabático (método das misturas), Figura 8, que consiste de garrafa térmica comercial, com capacidade para 1000mL. O fechamento da ampola foi feito com rolha de borracha, por meio da qual se introduz, no centro da garrafa, uma haste com termopar (Figura 6). Antes de iniciar os testes fez-se a calibração do calorímetro na faixa de temperatura utilizada no experimento (6 °C a 30 °C). Duas amostras de água destilada, com temperaturas diferentes, foram pesadas, determinando-se estas temperaturas. Pesou-se a ampola de vidro do Calorímetro Adiabático, com os saquinhos de polietileno vazios em seu interior, onde as amostras ficam acondicionadas. Fez-se a mistura das duas amostras de água destilada no calorímetro, marcando as mudanças de temperatura com o tempo, até atingir o equilíbrio térmico, e calculou-se o valor da capacidade térmica do calorímetro pela equação 45:

$$C_{pc} M_c = \frac{C_{pw} M_w (T_E - T_w) + C_{pw2} M_{w2} (T_E - T_{w2})}{T_E - T_w} \quad \text{Eq. 45}$$

onde:

T_{w2} = temperatura da água destilada (2) (°C);

T_E = temperatura de equilíbrio (°C);

T_w = temperatura da água destilada (1) (°C);

C_{pw2} = calor específico da água destilada (2) ($\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

C_{pw} = calor específico da água destilada (1) ($\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

C_{pc} = capacidade térmica do calorímetro ($\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

M_{w2} = massa da água destilada (2) (kg);

M_w = massa da água destilada (1) (kg);

M_c = massa do calorímetro (kg).

As amostras das polpas de fruta foram acondicionadas em saquinhos de polietileno, devidamente selados, com capacidade em torno de 80g cada, e mantidos em banho-maria à temperatura constante por 1 hora, para atingir o equilíbrio (30°C). A água destilada usada no interior de calorímetro estava a uma temperatura constante, abaixo da temperatura das amostras. Aproximadamente 450 mL de água destilada foi colocada dentro do calorímetro e imediatamente pesada, o calorímetro foi fechado até atingir o equilíbrio térmico entre o calorímetro e a água. Nesse momento colocou-se a amostra, previamente pesada, a uma temperatura constante, no interior do calorímetro, com aproximadamente 160 gramas (para cada ensaio utilizaram-se 2 saquinhos de polietileno). No início do experimento, começou-se a fazer a leitura da temperatura do termopar a cada trinta segundos, mantendo o calorímetro sob agitação até atingir o equilíbrio térmico. A massa dos saquinhos de polietileno (1 grama) foram descontadas da massa da amostra, para o cálculo do calor específico. A temperatura inicial da água destilada e a temperatura de equilíbrio foram também registradas para o cálculo do calor específico, determinado pela equação 46:

$$C_{pa} = (C_{pc}M_c + C_{pw}M_w) * (T_E - T_i) / (M_a * (T_a - T_E)) \quad \text{Eq. 46}$$

onde:

T_a = temperatura da amostra (°C);

T_E = temperatura de equilíbrio (°C);

T_i = temperatura de inicial (água) (°C);

C_{pa} = calor específico da amostra ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

C_{pw} = calor específico da água ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

C_{pc} = capacidade térmica do calorímetro ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

M_a = massa da amostra (kg);

M_w = massa da água adicionada (kg);

M_c = massa do calorímetro (kg).

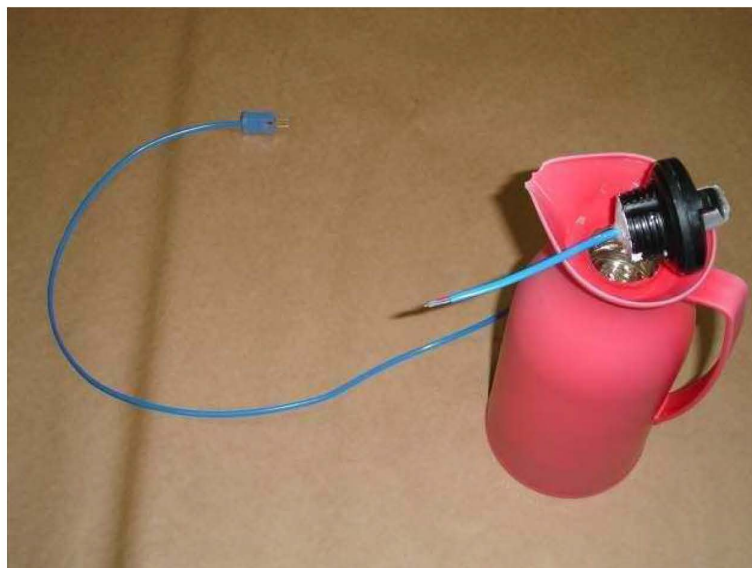


Figura 8. Calorímetro de Mistura. (Laboratório de Engenharia de Sistemas Agroalimentares , Faculdade de Engenharia de Alimentos/UNICAMP).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. UMIDADE

A seguir são apresentadas duas tabelas de umidade. Na Tabela 1, estão os valores de umidade relacionados às polpas das frutas: maracujá, tangerina ponkã, graviola, caju e acerola. Estes valores de umidade foram usados para o cálculo dos modelos teóricos de difusividade térmica, calor específico e concentrações de sólidos solúveis, como também para as possíveis correlações com as demais propriedades termofísicas. O coeficiente de variação foi calculado da seguinte forma:

$$CV(\%) = 100 \cdot \left(\frac{\text{desvio padrão}}{\text{média}} \right) \quad \text{Eq. 47}$$

Tabela 1: Valores experimentais de umidade das amostras de polpas de fruta, médias, desvios padrões e coeficientes de variação.

Amostras de polpa de fruta	Umidade (%)			
	Valores experimentais	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Maracujá	88,20	88,19 ± 0,022	0,022	0,025 %
	88,20			
	88,16			
Tangerina ponkã	88,58	88,49 ± 0,075	0,075	0,085 %
	88,44			
	88,47			
Graviola	89,78	89,80 ± 0,040	0,040	0,044 %
	89,77			
	89,84			
Caju	86,26	86,32 ± 0,061	0,061	0,070 %
	86,38			
	86,33			
Acerola	90,74	90,78 ± 0,040	0,040	0,044 %
	90,80			
	90,81			

Na Tabela 2, são mostrados os valores da umidade dos produtos hortícolas *in natura* que foram usados para a determinação da condutividade térmica experimental.

Tabela 2: Valores experimentais de umidade das amostras de produtos hortícolas, médias, desvios padrões e coeficientes de variação.

Amostras de produtos hortícolas	Umidade (%)			
	Valores experimentais	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Abóbora	95,18	95,33 ± 0,13	0,13	0,14 %
	95,37			
	95,43			
Berinjela	93,45	93,47 ± 0,062	0,062	0,066 %
	93,42			
	93,54			
Cebola	92,74	92,49 ± 0,80	0,80	0,86 %
	91,60			
	93,13			
Chuchu	94,95	94,91 ± 0,045	0,045	0,047 %
	94,92			
	94,86			
Banana nanica 1	71,07	72,52 ± 1,26	1,26	1,74 %
	73,12			
	73,37			
Banana nanica 2	71,39	71,69 ± 0,27	0,27	0,38 %
	71,93			
	71,76			
Caju	89,11	88,74 ± 0,40	0,40	0,45 %
	88,32			
	88,79			
Mamão 1	88,39	88,47 ± 0,16	0,16	0,18 %
	88,65			
	88,36			
Mamão 2	89,13	89,22 ± 0,28	0,28	0,32 %
	88,99			
	89,54			
Manga	84,03	83,48 ± 0,58	0,58	0,69 %
	82,87			
	83,55			

1- Primeiro ensaio; 2- Segundo ensaio

5.2. DENSIDADE E SÓLIDOS SOLÚVIES

Foram determinados os valores da densidade e sólidos solúveis (°Brix) das seguintes polpas de frutas: maracujá, tangerina ponkã, graviola, caju, e acerola, à temperatura de 30° C. Os resultados experimentais estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Valores experimentais médios de sólidos solúveis (Brix), densidade e seus respectivos desvios padrões e coeficientes de variação.

Amostras de polpas de frutas	Brix	Densidade (kg m ⁻³)	Desvio Padrão	Coeficiente de variação
Maracujá	11,5	1.046 ± 0,25	0,25	0,024
Tangerina ponkã	9,8	1.041 ± 0,73	0,73	0,070
Graviola	17,8	1.076 ± 0,66	0,66	0,062
Caju	10,9	1.053 ± 0,24	0,24	0,023
Acerola	10,2	1.038 ± 0,12	0,12	0,012

Foram encontrados na literatura, valores para a densidade de polpa de maracujá e de tangerina de 1.063 kg m⁻³ e 973 kg m⁻³ respectivamente, determinados por ALVARADO E ROMERO (1989), a 30°C. Estes valores não se aproximaram dos valores calculados experimentalmente. Os autores não definiram a umidade dos produtos, variável que pode alterar o valor da densidade.

A Tabela 4 mostra os valores experimentais das densidades das polpas de frutas com modelos de predição encontrados na literatura.

Observa-se que existe uma tendência dos valores da densidade aumentarem em função dos sólidos solúveis (°Brix), como pode ser observado na figura 9 onde são mostrados os valores experimentais e os modelos de predição da densidade em função com a concentração dos sólidos solúveis. As variações dos valores observadas ocorrem devido à diferença de composição de cada fruta, como fibras, umidade, etc.

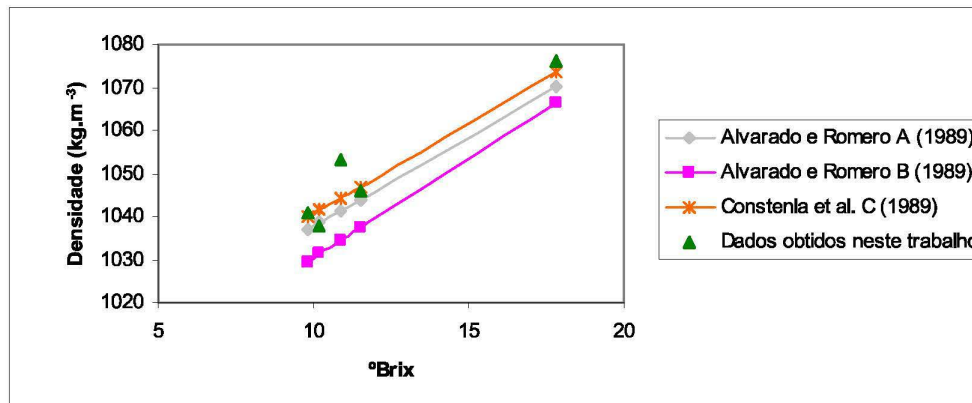


Figura 9. Valores experimentais de densidade de polpas de frutas em função do °Brix e modelos de predição.

Através dos valores experimentais, foi proposto um modelo para predizer a densidade de polpas de frutas em função do teor de sólidos solúveis a 30°C. A equação proposta (eq. 48) pode ser usada para polpas de frutas entre 10 °Brix e 18°Brix. O coeficiente de correlação foi de 0,9132.

$$\rho = 4,4181^\circ B + 997,61 \quad \text{Eq. 48}$$

Onde:

°B = concentração de sólidos solúveis (°Brix);

ρ = densidade (kg m⁻³).

Para o cálculo das densidades teóricas apresentadas na Tabela 4, modelos A, B e C, foram utilizadas as equações 2, 3 e 7 do item 3.1.1 respectivamente. A temperatura utilizada foi de 30°C, os °Brix, foram os valores experimentais da Tabela 3 e a densidade da água foi de 993,89 g cm⁻³. O erro percentual foi calculado da seguinte forma:

$$\text{Erro}(\%) = 100 \cdot \left| \frac{(\text{valor teórico} - \text{valor experimental})}{\text{valor experimental}} \right| \quad \text{Eq. 49}$$

Observando os valores da Tabela 4, constata-se que os modelos forneceram bons ajustes em relação às determinações experimentais, com erros percentuais máximos em torno de 1,7%.

Tabela 4: Valores experimentais médios de densidades das polpas de frutas com modelos de predição encontrados na literatura.

Amostras de polpas de frutas	Densidade (kg m ⁻³)		
	Modelo A*	Modelo B**	Modelo C***
	Erro (%)	Erro (%)	Erro (%)
Maracujá	1.044	1.037	1.047
	0,20	0,82	0,08
Tangerina ponkã	1.037	1.030	1.040
	0,40	1,10	0,11
Graviola	1.070	1.066	1.073
	0,54	0,89	0,23
Caju	1.041	1.035	1.044
	1,10	1,74	0,82
Acerola	1.039	1.031	1.042
	0,05	0,64	0,34

* ALVARADO E ROMERO (1989) – para polpas e sucos de frutas (5° a 30° Brix) – Eq. 2

** ALVARADO E ROMERO (1989) – para polpas e sucos de frutas (T = 0°C a 80°C; Até 30° Brix) – Eq. 3

*** CONSTENLA, LOZANO E CRAPISTE (1989) – para suco de maçã clarificado (T= 20°C a 80°C ; 12° a 68,5 °Brix) Eq. 7

O modelo que melhor representou os dados experimentais foi o Modelo C de CONSTENLA, LOZANO E CRAPISTE (1989) com erros percentuais variando de 0,08% a 0,82%. Os maiores erros percentuais encontrados foram para amostra de polpa de caju, com erros variando de 0,82% a 1,74%.

5.3. DIFUSIVIDADE TÉRMICA

A difusividade térmica foi determinada pelo método de Dickerson (1965). A temperatura inicial do banho foi em torno de 25°C, o banho foi aquecido a uma velocidade em torno de 1°C/minuto até atingir 60°C. Após a eliminação da maior parte do regime transiente, a diferença de temperatura entre os dois termopares se manteve constante em um intervalo de tempo. Este intervalo de tempo variou de experimento para experimento, mas todas as temperaturas ficaram entre 40°C e 60°C. Assim, a temperatura estabelecida para o cálculo da difusividade nos modelos propostos e da difusividade da água foi a média desse intervalo, ou seja, 50°C.

As tabelas 5, 6, 7, 8 e 9 mostram os valores experimentais obtidos para a difusividade térmica das polpas de fruta, sob taxa constante de aquecimento (A), a diferença de temperatura entre os termopares ($T_s - T_c$), a média geral dos valores de difusividade térmica para cada fruta, com os respectivos coeficientes de variação e desvios padrões.

5.3.1. Maracujá

Tabela 5: Valores experimentais de difusividade da polpa de maracujá.

Polpa de Maracujá	A ($^{\circ}\text{C s}^{-1}$)	$(T_s - T_c)$	Difusividade térmica (m^2s^{-1})
Amostra 1	0,0131	10,76	$1,96 \times 10^{-7}$
Amostra 2	0,0084	7,54	$1,80 \times 10^{-7}$
Amostra 3	0,0140	9,75	$2,31 \times 10^{-7}$
Média Geral = $2,02 \times 10^{-7} \pm 0,30 \times 10^{-7}$; Coeficiente de variação = 12,89%; Desvio padrão = $0,26 \times 10^{-7}$			

5.3.2. Tangerina ponkã

Tabela 6: Valores experimentais de difusividade da polpa de tangerina ponkã.

Polpa de Tangerina ponkã	A ($^{\circ}\text{C s}^{-1}$)	$(T_s - T_c)$	Difusividade térmica (m^2s^{-1})
Amostra 1	0,0119	14,32	$1,34 \times 10^{-7}$
Amostra 2	0,0082	12,10	$1,09 \times 10^{-7}$
Amostra 3	0,0097	14,39	$1,09 \times 10^{-7}$
Média Geral = $1,17 \times 10^{-7} \pm 0,17 \times 10^{-7}$; Coeficiente de variação = 12,30%; Desvio padrão = $0,14 \times 10^{-7}$			

5.3.3. Graviola

Tabela 7: Valores experimentais de difusividade da polpa de graviola.

Polpa de Graviola	A ($^{\circ}\text{C s}^{-1}$)	$(T_s - T_c)$	Difusividade térmica (m^2s^{-1})
Amostra 1	0,0122	14,56	$1,35 \times 10^{-7}$
Amostra 2	0,0127	14,32	$1,43 \times 10^{-7}$
Amostra 3	0,0127	14,31	$1,43 \times 10^{-7}$
Média Geral = $1,40 \times 10^{-7} \pm 0,053 \times 10^{-7}$; Coeficiente de variação = 3,29%; Desvio padrão = $0,046 \times 10^{-7}$			

5.3.4. Caju

Tabela 8: Valores experimentais de difusividade da polpa de caju.

Polpa de Caju	A ($^{\circ}\text{C s}^{-1}$)	($T_s - T_c$)	Difusividade térmica ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
Amostra 1	0,0128	14,22	$1,45 \times 10^{-7}$
Amostra 2	0,0135	14,85	$1,46 \times 10^{-7}$
Amostra 3	0,0123	15,28	$1,30 \times 10^{-7}$
Média Geral = $1,40 \times 10^{-7} \pm 0,10 \times 10^{-7}$; Coeficiente de variação = 6,39%; Desvio padrão = $0,090 \times 10^{-7}$			

5.3.5. Acerola

Tabela 9: Valores experimentais de difusividade da polpa de acerola.

Polpa de Acerola	A ($^{\circ}\text{C s}^{-1}$)	($T_s - T_c$)	Difusividade térmica ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
Amostra 1	0,0136	14,79	$1,48 \times 10^{-7}$
Amostra 2	0,0139	15,43	$1,45 \times 10^{-7}$
Amostra 3	0,0145	15,87	$1,47 \times 10^{-7}$
Média Geral = $1,47 \times 10^{-7} \pm 0,018 \times 10^{-7}$; Coeficiente de variação = 1,04%; Desvio padrão = $0,015 \times 10^{-7}$			

As médias experimentais dos valores de difusividade térmica variaram entre $1,17 \times 10^{-7}$ a $2,02 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$. Estes valores de difusividade estão bem próximos aos determinados por outros autores, como Alvarado (1994) com $1,31 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$, para polpa de tangerina e Azoubel et al.(2005), com $1,40 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$, para polpa de caju. Não foram encontrados, em revisão de literatura, valores para as demais polpas de fruta. O coeficiente de variação variou de 1,04% para acerola, até 12,89% para maracujá.

Nas figuras 10,11 e 12 pode-se observar no ensaio feito com a Amostra 1 de Polpa de Acerola, a evolução da temperatura nos dois termopares, com o tempo.

Na figura 10, observa-se que próximo aos 35 minutos, a diferença de temperatura entre os dois termopares é constante e seu valor é em torno de 15,00.

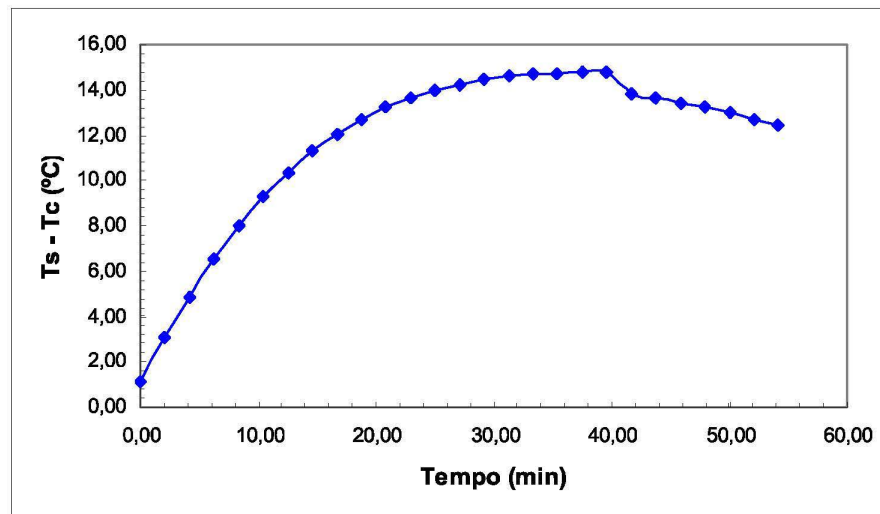


Figura 10. Diferenças de temperatura entre a superfície e o centro da cápsula metálica, em função do tempo, para determinação da difusividade da polpa de acerola, onde Ts é a temperatura na superfície e Tc é a temperatura no centro.

Na figura 11, pode-se observar que a medida que a temperatura do banho aumenta a temperatura da superfície (Ts) acompanha o mesmo valor, enquanto a temperatura do centro (Tc) mantém-se abaixo. Em determinado momento a diferença entre as duas temperaturas fica constante.

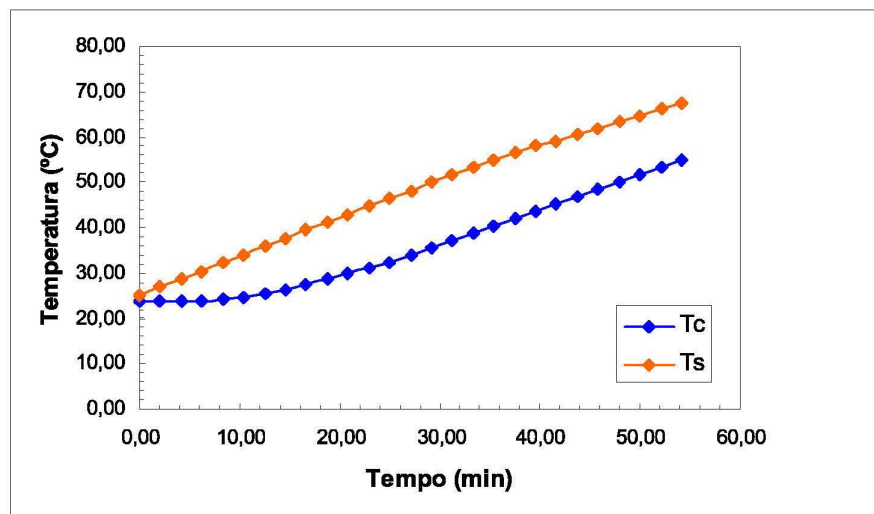


Figura 11. Evolução da temperatura com o tempo da polpa de acerola, para determinação da difusividade térmica.

Na figura 12, observa-se o gráfico da temperatura versus tempo dos dois termopares, e as equações geradas cujos coeficientes exprimem a taxa constante de aquecimento da polpa de acerola, para a determinação da difusividade térmica.

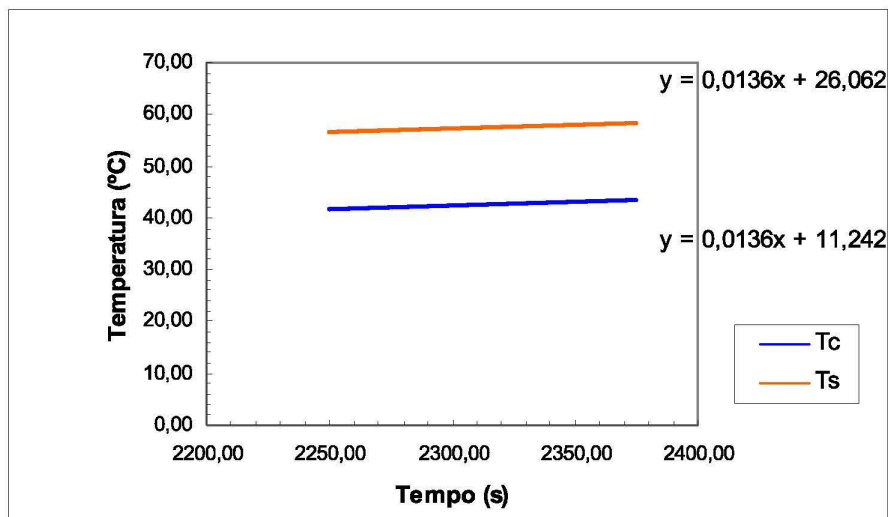


Figura 12. Equações das retas, cujos coeficientes angulares exprimem a taxa constante de aquecimento da polpa de acerola, para a determinação da difusividade térmica, onde Ts é a temperatura na superfície e Tc é a temperatura no centro.

Os valores encontrados experimentalmente foram comparados aos modelos propostos por RIEDEL (1969), MARTENS (1980) e TELIS-ROMERO et al. (1998), apresentados na Tabela 10. A temperatura escolhida para o cálculo dos modelos teóricos foi de 50°C. Esta temperatura é a média do intervalo entre 40° e 60°C onde a diferença entre os dois termopares se manteve constante. A unidade usada nos modelos foram as unidades experimentais da tabela 1.

Tabela 10: Valores médios da difusividade térmica experimental e dos modelos propostos e seus erros percentuais.

Amostras de Polpas de fruta	Difusividade térmica ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)			
	Valor Exp. Médio	Modelo D* Erro (%)	Modelo E** Erro (%)	Modelo F*** Erro (%)
Maracujá	$2,02 \times 10^{-7}$ $\pm 0,30 \times 10^{-7}$	$1,47 \times 10^{-7}$ 27,44%	$1,44 \times 10^{-7}$ 29,02%	$1,45 \times 10^{-7}$ 28,33%
Tangerina ponkã	$1,17 \times 10^{-7}$ $\pm 0,17 \times 10^{-7}$	$1,47 \times 10^{-7}$ 25,30%	$1,44 \times 10^{-7}$ 22,54%	$1,45 \times 10^{-7}$ 23,74%
Graviola	$1,40 \times 10^{-7}$ $\pm 0,053 \times 10^{-7}$	$1,48 \times 10^{-7}$ 5,38%	$1,45 \times 10^{-7}$ 2,99%	$1,46 \times 10^{-7}$ 4,02%
Caju	$1,40 \times 10^{-7}$ $\pm 0,10 \times 10^{-7}$	$1,46 \times 10^{-7}$ 3,75%	$1,43 \times 10^{-7}$ 1,59%	$1,44 \times 10^{-7}$ 2,55%
Acerola	$1,47 \times 10^{-7}$ $\pm 0,018 \times 10^{-7}$	$1,49 \times 10^{-7}$ 1,28%	$1,45 \times 10^{-7}$ 1,07%	$1,47 \times 10^{-7}$ 0,08%

* RIEDEL (1969) – para alimentos em geral. - Eq. 30

** MARTENS (1980) – para alimentos em geral. – Eq.31

*** TELIS-ROMERO et al. (1998) – suco de laranja não clarificado. – Eq. 29

Os erros percentuais variaram de 0,08% a 29,02%. Os valores experimentais que mais se aproximaram da literatura foram os das amostras de polpa de acerola, seguidos pelas polpas de caju e graviola, respectivamente. Os maiores erros percentuais encontrados foram para amostras de polpa de maracujá.

5.4. CALOR ESPECÍFICO

O calor específico foi determinado pelo método das misturas. A temperatura média de equilíbrio foi de 13°C, e os experimentos foram realizados em faixa de temperatura de 6 a 30 °C. Por esta razão, foi estabelecida a temperatura média de 18°C para o cálculo do calor específico dos modelos teóricos propostos, para comparação dos resultados experimentais. Para cada polpa de fruta foram realizados três experimentos, como é mostrado na Tabela 11:

Tabela 11: Valores experimentais de Calor Específico das amostras de polpas de fruta, médias, desvios padrões e coeficientes de variação.

Amostras de polpa de fruta	Calor Específico ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)			Coeficiente de Variação
	Valores experimentais	Média	Desvio Padrão	
Maracujá	3,98	$3,98 \pm 0,027$	0,024	0,60 %
	4,01			
	3,96			
Tangerina ponkã	3,88	$4,05 \pm 0,22$	0,19	4,80 %
	4,02			
	4,26			
Graviola	3,88	$3,90 \pm 0,13$	0,11	2,86 %
	3,81			
	4,03			
Caju	4,38	$4,15 \pm 0,29$	0,25	6,13 %
	3,87			
	4,19			
Acerola	4,08	$3,83 \pm 0,75$	0,65	16,87 %
	4,31			
	3,10			

As médias experimentais do calor específico variaram entre 3,83 a 4,15 $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Estes valores de calor específico estão próximos aos apresentados por outros autores, como Alvarado (1991) com 3,48 $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e no Hand Book, ASHRAE (1994) com 3,75 $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, ambos para tangerina. Não foram encontrados, em revisão de literatura, valores para as demais polpas de fruta. O coeficiente de variação variou de 0,60% para maracujá, até 16,87% para acerola.

Os valores encontrados experimentalmente foram comparados aos modelos propostos por ALVARADO (1991), SOUZA et al. (2000) e TELIS-ROMERO et al. (1998), como apresentado na Tabela 12.

Tabela 12: Valores médios de Calor Específico experimental e dos modelos propostos e seus erros percentuais.

Amostras de Polpas de fruta	Calor Específico ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)			
	Valor Exp. Médio	Modelo G* Erro (%)	Modelo H** Erro (%)	Modelo I*** Erro (%)
Maracujá	$3,98 \pm 0,027$	3,59 11,19 %	3,44 14,56 %	3,83 5,45 %
Tangerina ponkã	$4,05 \pm 0,22$	3,60 6,68 %	3,46 9,03 %	3,87 0,97 %
Graviola	$3,90 \pm 0,13$	3,64 14,96 %	3,55 20,09 %	3,77 8,98 %
Caju	$4,15 \pm 0,29$	3,53 9,86 %	3,31 13,56 %	3,82 3,96 %
Acerola	$3,83 \pm 0,75$	3,68 3,97 %	3,62 5,49 %	3,89 1,65 %

* ALVARADO (1991) – para sucos de fruta (1% - 96% de umidade) – Eq.33

** SOUZA et al. (2000) – para polpas de fruta – Eq.35

*** TELIS-ROMERO et al. (1998) – para suco de laranja não clarificado – Tabela.33

Os erros percentuais variaram de 0,97% a 20,09%. Os valores experimentais que mais se aproximaram dos modelos de literatura foram das amostras de polpas de acerola e de tangerina ponkã, respectivamente. Os maiores erros percentuais encontrados foram para amostras de polpa de graviola, isto pode ter ocorrido devido ao alto teor de fibras que esta fruta apresenta de acordo com a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos da USP, (USP, 2005).

5.5. CONDUTIVIDADE TÉRMICA

5.5.1. Condutividade Térmica pelo Método da Fonte Linear de Calor

A condutividade térmica foi calculada pela seguinte fórmula:

$$T_2 - T_1 = \left(\frac{CQ'}{4\pi k} \right) \cdot \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad \text{Eq. 50}$$

Rearranjando a equação, obtém-se:

$$k = C \cdot \underbrace{\frac{Q'}{4\pi} \left(\frac{\ln(t_2 / t_1)}{T_2 - T_1} \right)}_{k'} \quad \text{Eq. 51}$$

onde:

C = constante de calibração da sonda (fator de correção);

Q' = taxa constante de aquecimento por metro do fio aquecedor (Wm^{-1});

$\frac{T_2 - T_1}{\ln(t_2 / t_1)}$ = coeficiente angular da reta;

k = condutividade térmica experimental corrigida ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

k' = condutividade térmica experimental ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$).

Todos os dias, antes de cada experimento, era feita uma calibração da sonda. Os valores variaram entre 0,7 a 0,9, devido às condições ambientais do dia.

Para calcular Q' (taxa constante de aquecimento por metro do fio aquecedor), dividiu-se o calor gerado na amostra (potência) Q , pelo comprimento do fio aquecedor (0,066 m).

Plotando-se um gráfico com abscissa $\ln(t_2 - t_1)$ e ordenada $(T_2 - T_1)$ - (diferença de temperatura entre dois pontos), foi possível calcular o coeficiente angular em um trecho da reta do gráfico.

A seguir, são mostrados os gráficos da evolução do $\ln$ do tempo versus a diferença de temperatura entre os dois termopares, para o cálculo dos coeficientes angulares da condutividade das frutas e hortaliças escolhidas. Foi mostrado apenas um ensaio (repetição), para cada amostra.

5.5.1.1 Condutividade térmica da abóbora

Os coeficientes angulares dos experimentos com abóbora variaram de 1,82 a 2,16.

Observa-se na Figura 13 (repetição 9), pela relação entre $\ln(t_2-t_1)$ e (T_2-T_1) , os coeficientes de correlação, igual a 1,00 e o angular, igual a 2,16.

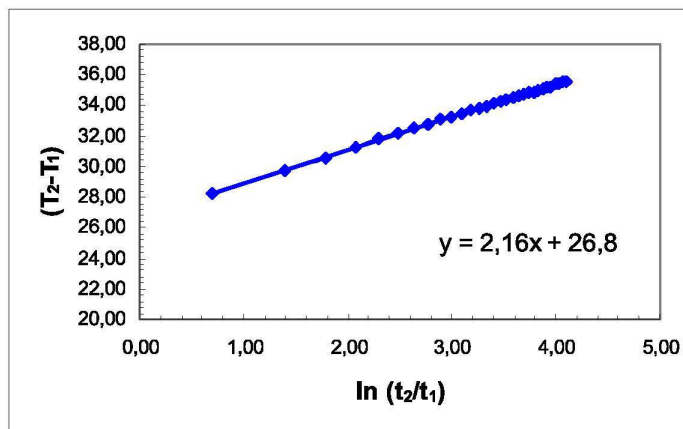


Figura 13. Evolução do $\ln(t)$ versus (T_2-T_1) para o cálculo do coeficiente angular da condutividade térmica da abóbora e equação da reta (repetição nº 9).

Os resultados experimentais obtidos nos experimentos com abóbora, na faixa de 30°C a 41°C e suas respectivas condutividades térmicas, considerando a constante de calibração da sonda ($C = 0,85$) que foi calculada antes do experimento, são mostrados na Tabela 13. O valor médio encontrado foi de $0,563 \pm 0,021$, com desvio padrão de 0,036 e coeficiente de variação de 6,45%.

Tabela 13: Resultados experimentais de condutividade térmica de abóbora

Repetição	Coef. angular	Q (W)	k' (W.m ⁻¹ C ⁻¹)	k (W.m ⁻¹ C ⁻¹)
1	1,83	1,0575	0,695	0,591
2	1,84	1,0575	0,692	0,588
3	1,87	1,0575	0,683	0,580
4	1,82	1,0575	0,702	0,597
5	1,82	1,0575	0,702	0,597
6	1,94	1,0575	0,659	0,560
7	2,19	1,0575	0,583	0,496
8	2,06	1,0575	0,618	0,525
9	2,16	1,0575	0,591	0,503
10	1,94	1,0575	0,659	0,560
11	1,83	1,0575	0,697	0,593
12	1,93	1,0575	0,661	0,562

Média geral = $0,563 \pm 0,021$; Coeficiente de variação = 6,45%; Desvio padrão = 0,036

Onde:

k' = condutividade térmica experimental ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

k = condutividade térmica experimental corrigida ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$).

5.5.1.2 Condutividade térmica da berinjela

Os coeficientes angulares dos experimentos com berinjela variaram de 3,24 à 4,56.

Observa-se na Figura 14 (repetição 3), onde estão plotados os valores de $\ln(t_2 - t_1)$ versus $(T_2 - T_1)$, o coeficiente de correlação é igual a 1,00 obtidos com amostras de berinjela, o coeficiente angular igual a 4,34.

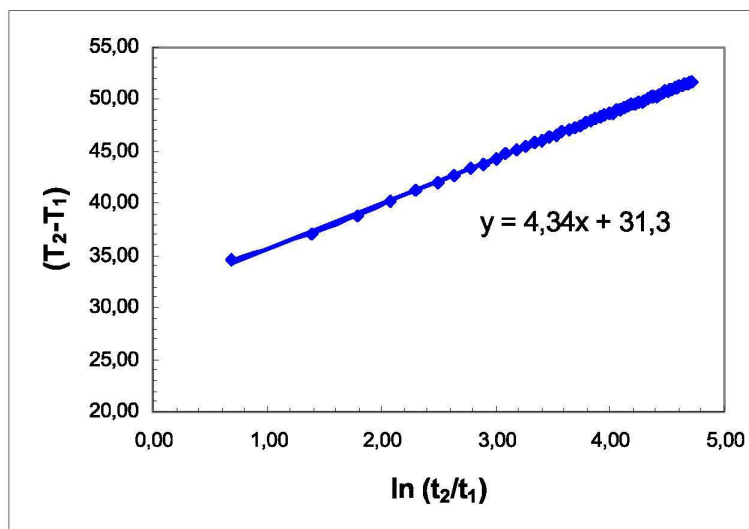


Figura 14: Evolução do $\ln(t)$ versus $(T_2 - T_1)$ para o cálculo do coeficiente angular e da condutividade térmica da berinjela e equação da reta (repetição nº 3)

Os resultados obtidos nos experimentos com berinjela na faixa de 20 a 50°C e suas respectivas condutividades térmicas, a constante de calibração da sonda ($C = 0,85$) que foi calculada antes do experimento, são mostrados na Tabela 14. O valor médio encontrado foi de $0,286 \pm 0,016$, com desvio padrão de 0,029 e coeficiente de variação de 10,29%.

Tabela 14. Resultados experimentais de condutividade térmica de berinjela.

Repetição	Coef. angular	Q (W)	k' (W.m ⁻¹ C ⁻¹)	k (W.m ⁻¹ C ⁻¹)
1	4,56	1,2917	0,342	0,291
2	4,34	1,2917	0,359	0,305
3	4,34	1,2917	0,359	0,305
4	4,55	1,0600	0,281	0,239
5	3,91	1,0600	0,327	0,278
6	3,67	1,0600	0,348	0,296
7	4,41	1,0600	0,290	0,246
8	4,41	1,0600	0,290	0,247
9	4,13	1,0600	0,310	0,263
10	3,24	1,0533	0,392	0,333
11	3,44	1,0508	0,368	0,313
12	3,51	1,0550	0,363	0,308
13	3,58	1,0508	0,354	0,301

Média geral = 0,286 ± 0,016 ; Coeficiente de variação = 10,29%; Desvio padrão = 0,029.

Onde:

k' = condutividade térmica experimental (W m⁻¹ °C⁻¹);

k = condutividade térmica experimental corrigida (W m⁻¹ °C⁻¹).

A condutividade térmica da berinjela apresentou-se bem abaixo do valor médio experimental para os demais produtos hortícolas.

5.5.1.3 Condutividade térmica da cebola

Os coeficientes angulares dos experimentos com cebola variaram de 1,82 à 2,00.

O coeficiente angular da cebola, igual a 1,86, foi obtido pela correlação entre os valores de $\ln(t_2 - t_1)$ versus $(T_2 - T_1)$, apresentada na Figura 15 (repetição 5), com coeficiente de correlação igual a 0,996

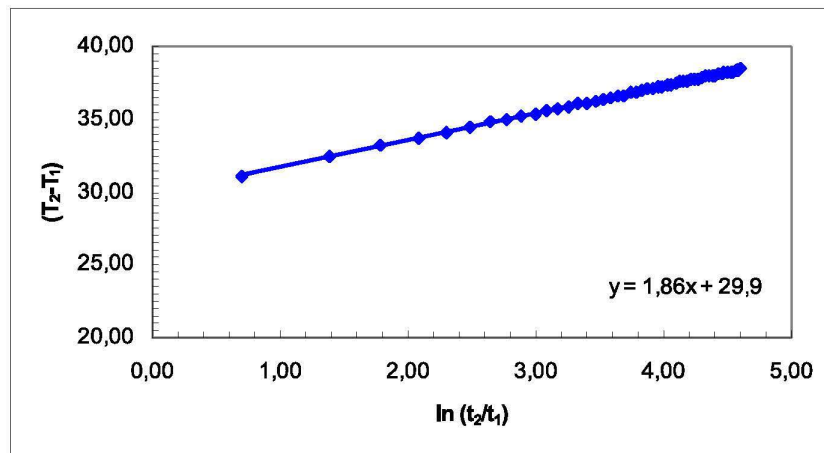


Figura 15. Evolução do $\ln(t)$ versus $(T_2 - T_1)$ para o cálculo do coeficiente angular da condutividade térmica da cebola e equação da reta (repetição nº 5).

Os resultados obtidos nos experimentos com cebola na faixa de 31 a 39°C e suas respectivas condutividades térmicas, a constante de calibração da sonda ($C = 0,90$) que foi calculada antes do experimento, estão apresentados na Tabela 15. O valor médio encontrado foi de $0,596 \pm 0,0063$ com um desvio padrão de 0,022 e coeficiente de variação de 3,67.

Tabela 15: Resultados experimentais e os valores de condutividade térmica de cebola.

Repetição	Coef. angular	Q (W)	k' ($\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$)	k ($\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$)
1	1,99	1,0575	0,641	0,577
2	1,88	1,0575	0,677	0,609
3	1,82	1,0575	0,699	0,629
4	1,99	1,0575	0,639	0,575
5	1,86	1,0575	0,686	0,618
6	2,00	1,0575	0,636	0,573
7	1,93	1,0575	0,661	0,595
8	1,88	1,0575	0,679	0,611
9	1,98	1,0575	0,643	0,579
10	1,98	1,0575	0,643	0,579
11	1,83	1,0575	0,696	0,626
12	2,00	1,0575	0,639	0,575

Média geral = $0,596 \pm 0,063$; Coeficiente de variação = 3,67%; Desvio padrão= 0,022.

]

Onde:

k' = condutividade térmica experimental ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

k = condutividade térmica experimental corrigida ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$).

5.5.1.4 Condutividade térmica do chuchu

Os coeficientes angulares dos experimentos com chuchu variaram de 1,61 à 2,78.

O coeficiente angular do chuchu, igual a 2,70, foi obtido pela correlação entre os valores de $\ln(t_2 - t_1)$ versus $(T_2 - T_1)$, apresentada na Figura 16 (repetição 1), com coeficiente de correlação igual a 1,00.

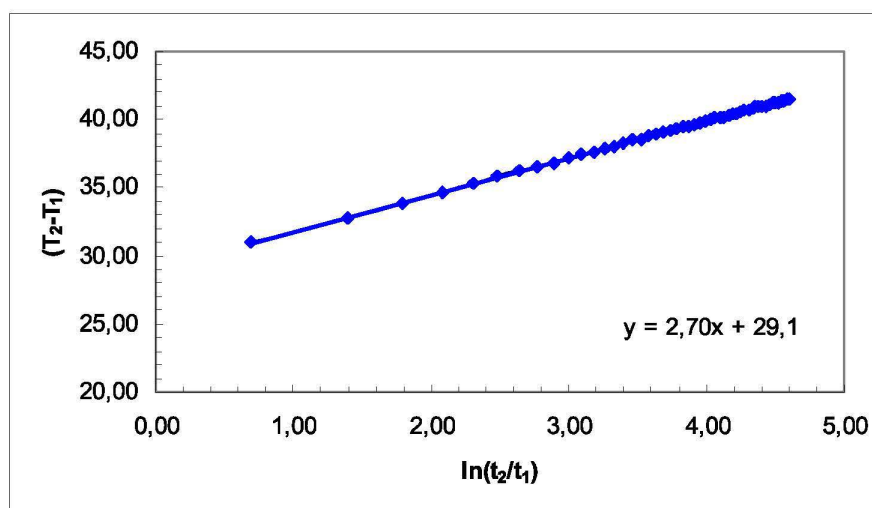


Figura 16. Evolução do $\ln(t)$ versus $(T_2 - T_1)$ para os cálculos do coeficiente angular e da condutividade térmica de chuchu e equação da reta - repetição nº1.

Os resultados obtidos nos experimentos com chuchu na faixa de 31 a 41°C, e suas respectivas condutividades térmicas, a constante de calibração da sonda ($C = 0,90$) que foi calculada antes do experimento, são mostrados na Tabela 16. O valor médio encontrado foi de $0,598 \pm 0,048$, com desvio padrão de 0,091 e coeficiente de variação de 15,14%.

Tabela 16: Resultados experimentais de condutividade térmica de chuchu.

Repetição	Coef. angular	Q (W)	k' (Wm ⁻¹ C ⁻¹)	k (Wm ⁻¹ C ⁻¹)
1	2,70	1,292	0,576	0,518
2	2,78	1,292	0,560	0,504
3	2,22	1,292	0,701	0,631
4	3,07	1,292	0,507	0,457
5	2,22	1,292	0,703	0,633
6	2,28	1,292	0,682	0,614
7	2,45	1,060	0,521	0,469
8	2,13	1,060	0,599	0,539
9	2,10	1,060	0,610	0,549
10	1,61	1,051	0,787	0,708
11	1,62	1,051	0,782	0,704
12	1,74	1,051	0,729	0,656
13	1,62	1,051	0,780	0,702
14	1,64	1,051	0,770	0,693

Média geral= 0,598 ±0,048 ; Coeficiente de variação= 15,14%; Desvio padrão= 0,091.

Onde:

k' = condutividade térmica experimental (W m⁻¹ °C⁻¹);

k = condutividade térmica experimental corrigida (W m⁻¹ °C⁻¹).

5.5.1.5 Condutividade térmica da banana nanica

Foram feitos dois ensaios com bananas nanicas, com propriedades físicas distintas (teor de umidade e Brix). Por esse motivo foram determinados dois valores de condutividade térmica para esta fruta.

Ensaio 1

Os coeficientes angulares dos experimentos com banana variaram de 1,99 à 2,58.

Observa-se na Figura 17 (repetição 9), que a reta obtida quando $\ln(t_2-t_1)$ é plotado contra (T_2-T_1) , apresenta coeficiente de correlação é 1,00 e coeficiente angular igual a 2,07.

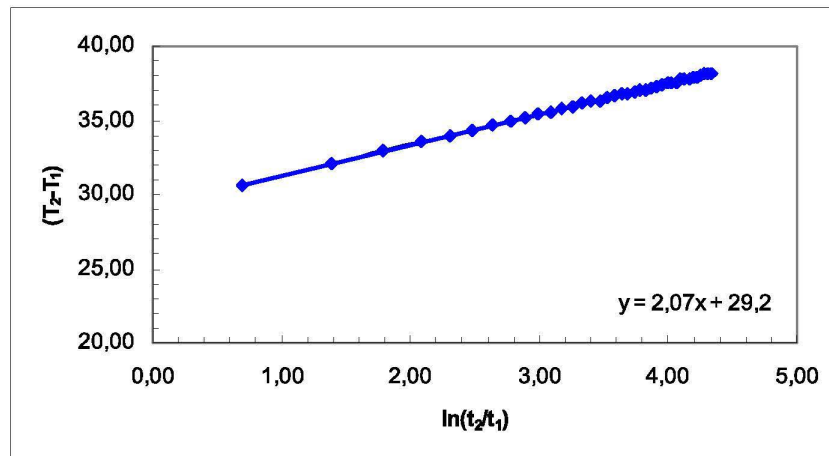


Figura 17. Evolução do $\ln(t)$ versus $(T_2 - T_1)$ para o cálculo do coeficiente angular da condutividade térmica da banana nanica _ ensaio 1, e equação da reta (repetição^o 9).

Os resultados obtidos nos experimentos para banana nanica, com °Brix de 20,5° e teor de umidade de 72,52%, na faixa de 31 a 42°C e suas respectivas condutividades térmicas, a constante de calibração da sonda ($C = 0,85$) que foi calculada antes do experimento, são mostrados na Tabela 17. O valor médio encontrado foi de $0,525 \pm 0,085$, com desvio padrão de 0,013 e coeficiente de variação de 2,43%.

Tabela 17: Resultados experimentais de condutividade térmica de banana nanica _ ensaio 1.

Repetição	Coef. angular	Q (W)	k' ($\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$)	k ($\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$)
1	2,47	1,2889	0,630	0,536
2	2,58	1,2889	0,603	0,513
3	2,50	1,2917	0,624	0,530
4	2,50	1,2917	0,623	0,529
5	2,50	1,2889	0,621	0,528
6	2,18	1,0600	0,586	0,498
7	2,03	1,0508	0,625	0,531
8	1,99	1,0508	0,636	0,541
9	2,07	1,0550	0,615	0,522

Média geral = $0,525 \pm 0,085$; Coeficiente de variação = 2,43%; Desvio padrão = 0,013

Onde:

k' = condutividade térmica experimental ($\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$);

k = condutividade térmica experimental corrigida ($\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$).

Ensaio 2

Os coeficientes angulares dos experimentos com banana variaram de 1,96 a 2,10.

Observa-se, na Figura 18 (repetição 1), que a reta obtida com os valores de $\ln(t_2-t_1)$ e (T_2-T_1) , com coeficiente de correlação igual 0,997, apresenta coeficiente angular de 1,96.

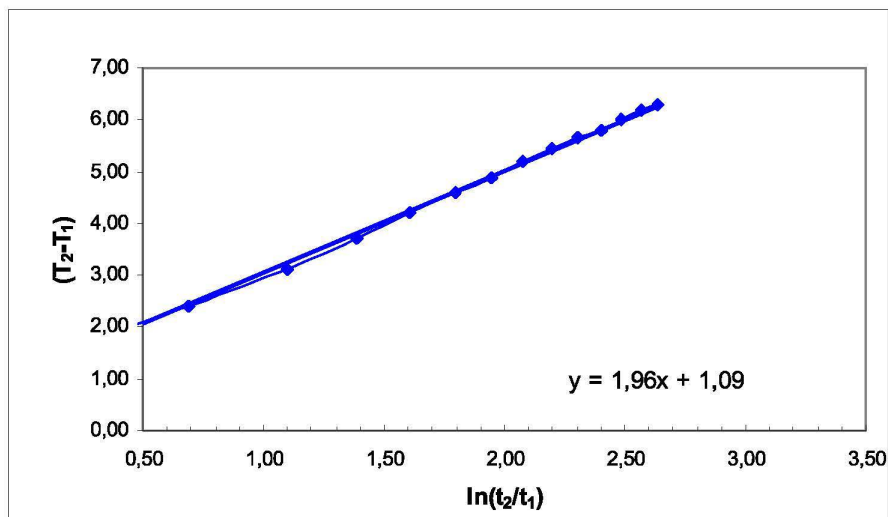


Figura 18. Evolução do $\ln(t)$ versus (T_2-T_1) para os cálculos do coeficiente angular e da condutividade térmica da banana nanica_ensaio 2, e equação da reta (repetição nº1).

Os resultados obtidos nos experimentos para banana nanica, com °Brix de 20,0°, e teor de umidade de 71,69%, na faixa de 30-35°C e suas respectivas condutividades térmicas, a constante de calibração da sonda ($C = 0,70$) que foi calculada antes do experimento, estão apresentadas na Tabela 18. O valor médio encontrado foi de $0,535 \pm 0,015$, com desvio padrão de 0,017, e coeficiente de variação de 3,09%.

Tabela 18: Resultados experimentais de condutividade térmica de banana nanica_ensaio 2.

Repetição	Coef. angular	Q (W)	k' (Wm ⁻¹ C ⁻¹)	k (Wm ⁻¹ C ⁻¹)
1	1,96	1,28805	0,792	0,554
2	1,99	1,28805	0,782	0,547
3	2,03	1,28805	0,763	0,534
4	2,09	1,28805	0,742	0,520
5	2,10	1,28805	0,738	0,517

Média geral= $0,535 \pm 0,015$; Coeficiente de variação= 3,09%; Desvio padrão= 0,017

Onde:

k' = condutividade térmica experimental ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

k = condutividade térmica experimental corrigida ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$).

5.5.1.6 Condutividade térmica do caju

Os coeficientes angulares dos experimentos com caju variaram de 1,69 à 1,95.

Observa-se na reta da Figura 19 (repetição 10), obtida pelo lançamento de $\ln(t_2-t_1)$ versus (T_2-T_1) , que o coeficiente de correlação é 0,999 e o coeficiente angular, 1,69.

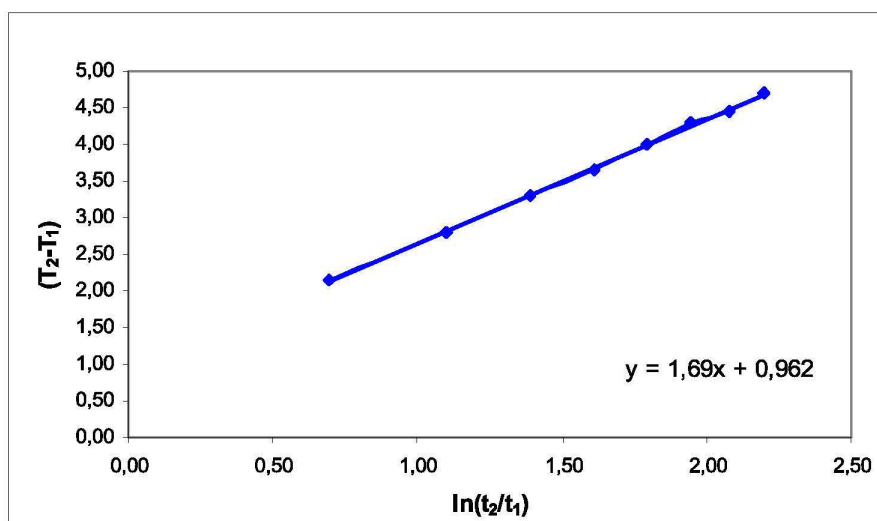


Figura 19. Evolução do $\ln(t)$ versus (T_2-T_1) para os cálculo do coeficiente angular e da condutividade térmica do caju e equação da reta (repetição nº 10).

Na Tabela 19 estão mostrados os resultados obtidos nos experimentos para o caju, com °Brix igual a 8,5°, numa faixa de 27 a 33°C e suas respectivas condutividades térmicas, a constante de calibração da sonda ($C = 0,70$) que foi calculada antes do experimento, são mostradas na tabela 19. O valor médio encontrado foi de $0,605 \pm 0,018$ com desvio padrão de 0,028 e coeficiente de variação de 4,67%.

Tabela 19: Resultados experimentais de condutividade térmica de caju.

Repetição	Coef. angular	Q (W)	k' (Wm ⁻¹ C ⁻¹)	k (Wm ⁻¹ C ⁻¹)
1	1,77	1,29082	0,879	0,615
2	1,73	1,29359	0,902	0,631
3	1,95	1,29082	0,799	0,559
4	1,89	1,29359	0,825	0,578
5	1,87	1,29359	0,832	0,582
6	1,81	1,29359	0,861	0,603
7	1,78	1,29359	0,877	0,614
8	1,87	1,29359	0,836	0,585
9	1,72	1,29359	0,906	0,634
10	1,69	1,29359	0,923	0,646

Média geral= 0,605 ±0,018 ; Coeficiente de variação = 4,67%; Desvio padrão= 0,028.

Onde:

k' = condutividade térmica experimental (W m⁻¹ °C⁻¹);

k = condutividade térmica experimental corrigida (W m⁻¹ °C⁻¹).

5.5.1.7 Condutividade térmica do mamão formosa

Foram feitos dois ensaios para mamão formosa, com propriedades físicas distintas (teores de umidade e Brix), determinando-se dois valores distintos de condutividade térmica para esta fruta.

Ensaio 1

Os coeficientes angulares dos experimentos com mamão variaram de 1,82 à 3,05 como pode ser visto na tabela 20.

Observa-se na Figura 20 (repetição 5), que a reta obtida quando $\ln(t_2 - t_1)$ é plotado contra $(T_2 - T_1)$, apresenta coeficiente de correlação é 0,999 e coeficiente angular igual a 2,62.

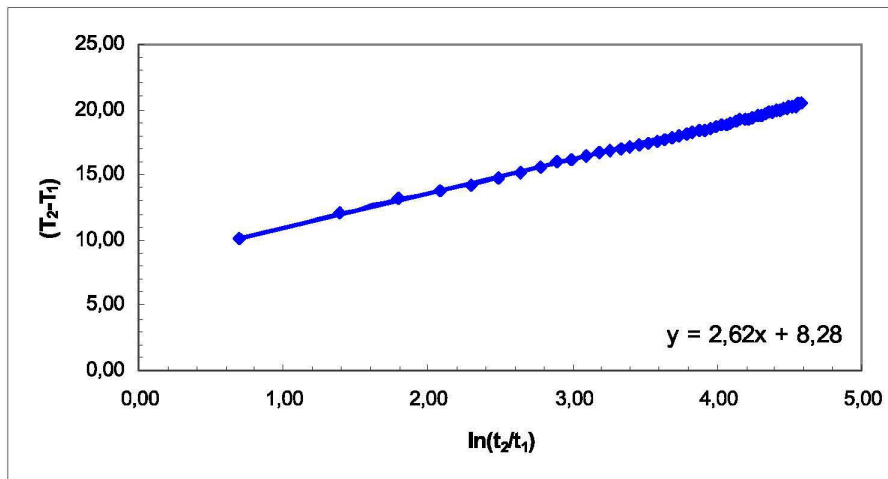


Figura 20. Evolução do $\ln(t)$ versus $(T_2 - T_1)$ para os cálculos do coeficiente angular e da condutividade térmica do mamão formosa_ensaio 1, e equação da reta (repetição nº 5).

Os resultados obtidos nos experimentos para mamão formosa, com 14°Brix, e teor de umidade de 88,47%, na faixa de 15 a 42°C e suas respectivas condutividades térmicas, a constante de calibração da sonda ($C = 0,90$) que foi calculada antes do experimento, são mostrados na Tabela 20. O valor médio encontrado foi $0,543 \pm 0,042$, com desvio padrão de 0,072 e coeficiente de variação de 13,31%.

Tabela 20: Resultados experimentais de condutividade térmica de mamão formosa_ensaio 1.

Repetição	Coef. angular	Q (W)	k' ($\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$)	k ($\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$)
1	2,48	1,2917	0,628	0,565
2	2,79	1,2917	0,558	0,502
3	2,20	1,2917	0,707	0,636
4	3,05	1,2917	0,511	0,460
5	2,62	1,0575	0,487	0,438
6	2,30	1,0575	0,554	0,498
7	2,12	1,0575	0,601	0,541
8	2,57	1,0575	0,496	0,447
9	1,89	1,0508	0,671	0,604
10	1,88	1,0508	0,673	0,605
11	1,82	1,0508	0,695	0,625
12	1,91	1,0508	0,662	0,596

Média geral = $0,543 \pm 0,042$; Coeficiente de variação = 13,31%; Desvio padrão= 0,072

Onde:

k' = condutividade térmica experimental ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

k = condutividade térmica experimental corrigida ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$).

Ensaio 2

Os coeficientes angulares dos experimentos com mamão variaram de 1,79 à 1,88 como pode ser visto na tabela 21.

Observa-se na Figura 21 (repetição 1) que a reta obtida no lançamento de $\ln(t_2-t_1)$ versus (T_2-T_1) , apresenta coeficiente de correlação de 0,997 e coeficiente angular de 1,79.

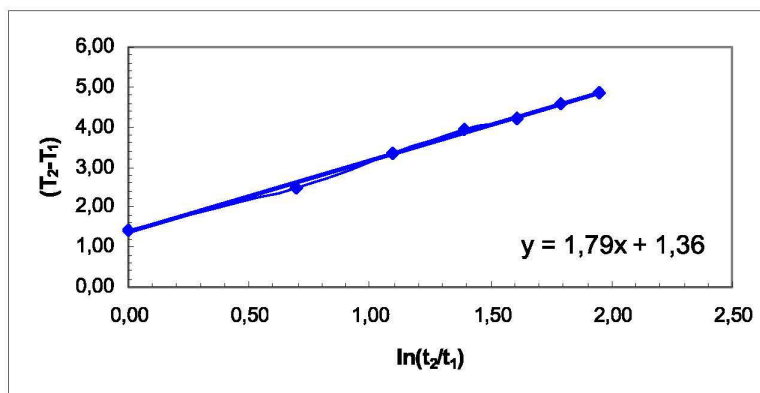


Figura 21. Evolução do $\ln(t)$ versus (T_2-T_1) para os cálculos do coeficiente angular e da condutividade térmica do mamão formosa – ensaio 2, e equação da reta (repetição nº 1).

Os resultados obtidos nos experimentos para mamão formosa, com 10°Brix, teor de umidade de 89,22%, em faixa de temperatura de 28 a 32°C e suas respectivas condutividades térmicas, a constante de calibração da sonda ($C = 0,70$) que foi calculada antes do experimento, estão apresentados na Tabela 21. O valor médio encontrado foi $0,587 \pm 0,011$, com desvio padrão de 0,014 e coeficiente de variação de 2,36%.

Tabela 21: Resultados experimentais de condutividade térmica de mamão formosa_ensaio 2.

Repetição	Coef. angular	Q (W)	k' (Wm ⁻¹ C ⁻¹)	k (Wm ⁻¹ C ⁻¹)
1	1,79	1,26225	0,849	0,594
2	1,88	1,26225	0,809	0,566
3	1,87	1,28528	0,830	0,581
4	1,86	1,28805	0,834	0,584
5	1,84	1,28528	0,842	0,590
6	1,79	1,29082	0,868	0,607

Média geral = 0,587 ±0,011 ; Coeficiente de variação = 2,36%; Desvio padrão= 0,014

Onde:

k' = condutividade térmica experimental (W m⁻¹ °C⁻¹);

k = condutividade térmica experimental corrigida (W m⁻¹ °C⁻¹).

5.5.1.8 Condutividade térmica da manga Tommy Atkins

Os coeficientes angulares dos experimentos com manga variaram de 1,86 à 2,05, como pode ser visto na tabela 22.

Observa-se na figura 22 (repetição 6), que o lançamento de $\ln(t_2-t_1)$ versus (T_2-T_1) , resultou em reta com coeficiente de correlação igual a 0,999 e coeficiente angular de 1,86.

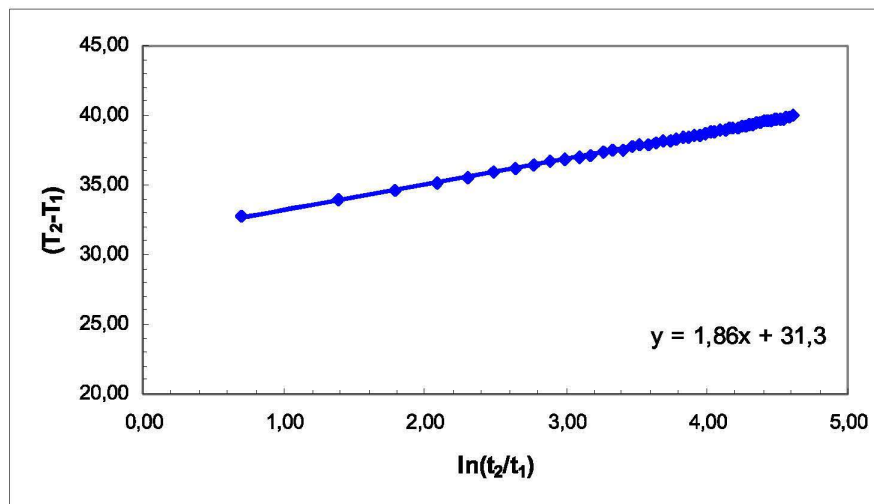


Figura 22. Evolução do $\ln(t)$ versus (T_2-T_1) para os cálculos do coeficiente angular e da condutividade térmica de manga Tommy Atkins e equação da reta (repetição nº 6).

Os resultados obtidos nos experimentos para manga Tommy Atkins, com Brix de 16,8°, em faixa de 32 a 41°C, e suas respectivas condutividades térmicas, a constante de calibração da sonda ($C = 0,85$) que foi calculada antes do experimento, compõem a Tabela 22. O valor médio encontrado foi $0,562 \pm 0,093$, com desvio padrão de 0,016, e coeficiente de variação de 2,85%.

Tabela 22: Resultados experimentais de condutividade térmica de manga Tommy Atkins.

Repetição	Coef. angular	Q (W)	k' ($\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$)	k ($\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$)
1	1,91	1,0575	0,668	0,568
2	2,00	1,0575	0,638	0,542
3	1,89	1,0575	0,676	0,574
4	1,89	1,0575	0,676	0,575
5	1,89	1,0575	0,673	0,572
6	1,86	1,0575	0,684	0,581
7	2,05	1,0575	0,621	0,528
8	1,99	1,0575	0,641	0,545
9	1,91	1,06	0,669	0,569
10	1,89	1,0575	0,673	0,572
11	1,95	1,06	0,654	0,556
12	1,92	1,0575	0,664	0,564

Média geral = $0,562 \pm 0,093$; Coeficiente de variação = 2,85%; Desvio padrão = 0,016.

Onde:

k' = condutividade térmica experimental ($\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$);

k = condutividade térmica experimental corrigida ($\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$).

Na Tabela 23 estão agrupados os valores de condutividade térmica e as faixas de temperatura deste trabalho, para frutas e hortaliças.

Tabela 23 Resultados experimentais de condutividades térmicas de frutas e hortaliças *in natura*.

Hortaliças <i>in natura</i>	Condutividade (Wm⁻¹ °C⁻¹)*	Faixa de temperatura °C	Nº de ensaios
Abóbora	0,563 ± 0,021	(30 a 41)	12
Berinjela	0,286 ± 0,016	(20 a 50)	13
Cebola	0,596 ± 0,063	(31 a 39)	12
Chuchu	0,598 ± 0,048	(31 a 41)	14
Frutas <i>in natura</i>	Condutividade	Faixa de temperatura	
Banana ¹	0,525 ± 0,085	(31 a 42)	9
Banana ²	0,535 ± 0,015	(30 a 35)	5
Caju	0,605 ± 0,018	(27 a 33)	10
Mamão ¹	0,543 ± 0,042	(15 a 42)	12
Mamão ²	0,587 ± 0,011	(28 a 32)	6
Manga	0,562 ± 0,093	(32 a 41)	12

1- Primeiro ensaio; 2- Segundo ensaio.

Os valores encontrados experimentalmente foram comparados aos modelos propostos por RIEDEL (1949), SWEAT (1974) e COMINI (1974) e estão apresentados na Tabela 24.

A temperatura estabelecida para o cálculo das condutividades térmicas nos modelos propostos foi a temperatura média, para cada ensaio realizado, que se encontra na tabela 24 juntamente com os valores das umidades experimentais.

Tabela 24: Valores médios das condutividades térmicas determinadas experimentalmente e através dos modelos propostos, e seus erros percentuais, de hortaliças e frutas.

Condutividade térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$)						
Amostra hortaliças	Temp (°C)	Umid. (%)	Valor exp. médio	Modelo J* Erro (%)	Modelo L** Erro (%)	Modelo M*** Erro (%)
Abóbora	34,0	95,33	0,563	0,604 6,79 %	0,618 8,90 %	0,575 2,02 %
Berinjela	40,0	93,47	0,286	0,606 52,81 %	0,609 53,02 %	0,568 49,69 %
Cebola	35,0	92,49	0,596	0,596 0 %	0,604 1,32 %	0,565 5,45 %
Chuchu	35,0	94,91	0,598	0,604 0,99 %	0,616 2,91 %	0,573 4,33 %
Condutividade térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$)						
Amostra frutas	Temp (°C)	Umid. (%)	Valor exp. médio	Modelo J* Erro (%)	Modelo L** Erro (%)	Modelo M*** Erro (%)
Banana nanica ¹	36,5	72,52	0,525	0,531 1,13 %	0,506 3,85 %	0,499 5,14 %
Banana nanica ²	32,0	71,69	0,535	0,532 0,56 %	0,501 6,69 %	0,497 7,74 %
Caju	38,0	88,74	0,605	0,590 2,54 %	0,585 3,33 %	0,553 9,43 %
Mamão formosa ¹	32,0	88,47	0,543	0,578 6,06 %	0,584 7,05 %	0,552 1,62 %
Mamão formosa ²	30,0	89,22	0,587	0,576 1,91 %	0,588 0,15 %	0,554 5,88 %
Manga Tommy Atkins	38,0	83,48	0,562	0,569 1,23 %	0,560 0,44 %	0,535 4,95 %

*RIEDEL (1949) – sucos de fruta, leite e soluções de açúcares, em uma faixa de temperatura de (0-80°C) - Eq.22

**SWEAT (1974) – alimentos em geral de umidade elevada – Eq.21

***COMINI (1974) – modelo geral para alimentos a aproximadamente 25°C – Eq.23

1- Primeiro ensaio; 2- Segundo ensaio.

As médias experimentais dos valores de condutividade térmica variaram entre 0,286 a 0,605 $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. Com exceção da berinjela, os valores de condutividade térmica experimentais,

estão próximos de valores determinados por outros autores, como Kurozawa (2005), com valores entre 0,580 a 0,620 $\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$ para mamão papaya e Sweat (1974) e 0,574 $\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$, a 28°C, para cebola *in natura*. Não foram encontrados valores de condutividade térmica, pelo método da sonda, para os demais produtos hortícolas. O coeficiente de variação variou de 2,36%, para mamão, até 15,14%, para chuchu.

Os erros percentuais variaram de 0% a 52,81%. Os valores experimentais que mais se aproximaram dos de literatura foram das amostras de manga e cebola. Os maiores erros percentuais encontrados foram para amostras de berinjela, que pode ter ocorrido devido à alta porosidade da mesma (armazenamento de ar em seu interior). De acordo com a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos da USP, o teor de fibras da berinjela se encontra na média das demais amostras analisadas, assim isto não justifica a diferença no seu resultado.

5.5.2. Condutividade Térmica calculada a partir da aproximação geral da Equação de Fourier

De acordo com os valores encontrados experimentalmente para difusividade térmica, calor específico e densidade, das polpas de maracujá, tangerina, graviola, caju e acerola, suas condutividades térmicas foram calculadas pela aproximação geral da Equação de Fourier (equação 10).

Tabela 25: Valores de condutividade térmica calculados pela aproximação geral da Equação de Fourier, médias, desvios padrões e coeficientes de variação.

Amostras de Polpas de frutas	Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$)			
	k calculado	k médio	Desvio Padrão	Coeficiente de variação
Maracujá	0,816	$0,842 \pm 0,13$	0,11	12,89 %
	0,749			
	0,962			
Tangerina ponkã	0,565	$0,495 \pm 0,070$	0,06	12,30 %
	0,460			
	0,460			
Graviola	0,567	$0,589 \pm 0,022$	0,019	3,29 %
	0,600			
	0,600			
Caju	0,633	$0,613 \pm 0,045$	0,039	6,39%
	0,637			
	0,568			
Acerola	0,585	$0,583 \pm 0,0070$	0,0061	1,04 %
	0,584			
	0,576			

Os valores médios de condutividade térmica calculados ficaram entre 0,495 e 0,842 $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. Com exceção da polpa de maracujá, os valores de condutividade térmica calculados pela aproximação geral da Equação de Fourier, ficaram dentro de uma faixa de valores esperada. Foram encontrados valores teóricos para polpas de tangerina de 0,490 $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ determinado por Alvarado (1994) pela aproximação geral da Equação de Fourier, este valor se aproximou muito do valor experimental deste trabalho de 0,495 $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. Os coeficientes de variação oscilaram de 1,04% para acerola, até 12,89% para maracujá. Observou-se que o valor da condutividade térmica calculado pela aproximação geral da Equação de Fourier relaciona-se com a difusividade, em uma ordem de 10^{-7} ; com a densidade, em uma ordem de 10^3 ; e com o calor específico, em uma ordem de 10^3 . Como os valores de calor específico são em torno de 4 vezes maiores do que os da densidade, um pequeno erro na sua determinação levará a um erro proporcional no valor da condutividade térmica, o que pode ter ocorrido com a polpa de maracujá.

5.5.3. Comparações entre: Método da Sonda e aproximação geral da Equação de Fourier para polpa de fruta e produto *in natura*.

Os valores de condutividade térmica para caju *in natura*, determinados pelo método da sonda, foram comparados com os resultados das condutividades térmicas das polpas de caju, calculados pelo método de Fourier através dos valores de difusividade térmica, calor específico e densidade, determinados anteriormente.

Esta comparação tem como objetivo observar se existe uma diferença significativa entre os valores de polpa e fruto *in natura* de uma mesma amostra e estabelecer uma relação entre os métodos utilizados.

Na tabela 26, encontram-se os valores experimentais de condutividade térmica para caju, *in natura*, e os calculados pela aproximação geral da Equação de Fourier para polpa de caju.

Tabela 26: Valores experimentais da condutividade térmica para caju *in natura* e os calculados pela aproximação geral da Equação de Fourier com polpa de caju.

Repetição	k Fourier (polpa)	k Sonda (<i>in natura</i>)
1	0,633	0,615
2	0,637	0,631
3	0,568	0,559
4	-	0,578
5	-	0,582
6	-	0,603
7	-	0,614
8	-	0,585
9	-	0,634
10	-	0,646

Primeiro foi feito o teste f para verificar se existe diferença entre as variâncias. Como o valor de F calculado foi menor que o F crítico, presume-se que as variâncias são equivalentes.

Tabela 27: Teste f para condutividade térmica de caju.

Teste f	k Fourier	k Sonda
Média	0,613	0,605
Variância	0,00153	0,00080
Observações	3	10
gl	2	9
F	1,926	
P(F<=f) uni-caudal	0,201	
F crítico uni-caudal	4,256	

Depois foi realizado o teste t para duas amostras, presumindo-se variâncias equivalentes. Como o Stat t foi menor do que o t crítico, pode-se afirmar que os métodos são equivalentes e que não existe diferença significativa entre os valores de condutividade térmica para caju *in natura* e polpa de caju.

Tabela 28: Teste t para condutividade térmica de caju.

Teste t	k Fourier	k Sonda
Média	0,613	0,605
Variância	0,00153	0,00080
Observações	3	10
Variância agrupada	0,000929	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	11	
Stat t	0,396	
P(T<=t) uni-caudal	0,350	
t crítico uni-caudal	1,796	
P(T<=t) bi-caudal	0,700	
t crítico bi-caudal	2,201	

5.6. RESUMO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram elaboradas três tabelas (29, 30 e 31) com os valores das propriedades termofísicas obtidas experimentalmente, separadas por: frutas in natura, polpas de fruta e hortaliças in natura.

Tabela 29: Valores das propriedades termofísicas de frutas *in natura* obtidas experimentalmente.

Frutas <i>in natura</i>	Teor de Umidade (%)	°Brix	Condutividade (W m ⁻¹ °C ⁻¹)*	Faixa de temperatura (°C)
Banana ¹	72,52	20,5	0,525 ± 0,085	31 a 42
Banana ²	71,69	20,0	0,535 ± 0,015	30 a 35
Caju	88,74	8,5	0,605 ± 0,018	27 a 33
Mamão ¹	88,47	14,0	0,543 ± 0,042	15 a 42
Mamão ²	89,22	10,0	0,587 ± 0,011	28 a 32
Manga	83,48	16,8	0,562 ± 0,093	32 a 41

* Método da Fonte Linear de Calor (Sonda); 1 – Primeiro ensaio; 2 – Segundo ensaio.

Tabela 30: Valores das propriedades termofísicas de polpas de frutas obtidas experimentalmente.

Polpas de fruta	Teor de Umidade (%)	°Brix	Densidade (kg m ⁻³)*	Difusividade (m ² s ⁻¹)**	Calor Específico (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹ ***)
Acerola	90,78 ± 0,046	10,2	1.038 ± 0,14	(1,47 ± 0,018) x 10 ⁻⁷	3,83 ± 0,75
Caju	86,32 ± 0,070	10,9	1.053 ± 0,28	(1,40 ± 0,10) x 10 ⁻⁷	4,15 ± 0,29
Graviola	89,80 ± 0,046	17,8	1.076 ± 0,76	(1,40 ± 0,053) x 10 ⁻⁷	3,90 ± 0,13
Maracujá	88,19 ± 0,025	11,5	1.046 ± 0,29	(2,02 ± 0,30) x 10 ⁻⁷	3,98 ± 0,027
Tangerina	88,49 ± 0,086	9,8	1.041 ± 0,84	(1,17 ± 0,17) x 10 ⁻⁷	4,05 ± 0,22

* 30°C – Método do Picnômetro; ** 40°C a 60°C – Método de Dickerson; *** 6°C a 30°C – Método das Misturas.

Tabela 31: Valores das propriedades termofísicas de hortaliças *in natura* obtidas experimentalmente.

Hortaliças <i>in natura</i>	Teor de Umidade (%)	Condutividade (W m ⁻¹ °C ⁻¹)*	Faixa de temperatura (°C)
Abóbora	95,33	0,563 ± 0,021	30 a 41
Berinjela	93,47	0,286 ± 0,016	20 a 50
Cebola	92,49	0,596 ± 0,063	31 a 39
Chuchu	94,91	0,598 ± 0,048	31 a 41

*Método da Fonte Linear de Calor (Sonda); 1 – Primeiro ensaio; 2 – Segundo ensaio.

5.7. COMPILAÇÃO DE UM BANCO DE DADOS DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

Do resultado da revisão bibliográfica elaboraram-se quatro tabelas (32, 33, 34 e 35) separadas por propriedades termofísicas: densidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica, incluindo dados encontrados na literatura nacional e internacional. As tabelas contêm, além dos valores das propriedades termofísicas, o nome científico, o método usado para a determinação, o estado (polpa ou *in natura*), a fonte bibliográfica, as equações, as correlações e os valores de erro.

5.7.1. Valores de densidade (ρ) de produtos hortícolas

Tabela 32: Valores de densidade (ρ) de produtos hortícolas.

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			DENSIDADE (ρ) (kg m ⁻³)	CAMPO DE APLICAÇÃO	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade (%)	°Brix	pH				
Abacate (polpa) (<i>Persea drymifolia</i>)⊗	75,9	NE	NE	973	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Abacate (polpa) (<i>Persea drymifolia</i>)⊗	NE	1,9	6,7	959 936 904 $\rho = A - B(T) + C \times 10^{-3}(T)^2 - D \times 10^{-5}(T)^3$ (onde: A= 1005 ; B= 0,265 ; C= 1,178 D= 10,469 ; R ² =0,998)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Abacaxi (polpa) (<i>Ananas comosus</i> L.)⊗	85,3	NE	NE	810	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Abacaxi (polpa) (<i>Ananas comosus</i> L.)⊗	NE	13,9	3,5	1036 1029 1019 $\rho = A - B(T) + C \times 10^{-3}(T)^2 - D \times 10^{-5}(T)^3$ (onde: A= 1059 ; B= 0,343 ; C= 1,509 D= 4,143 ; R ² =0,993)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Açaí (polpa) (<i>Euterpe Oleracea</i> , Mart.)	84,73	4,8	5,23	$\rho = 1.068,65 - 0,4579.(Xw.100) - 0,3867.T$	10 a 50°C	Picnômetro	Pereira et al. (2002)
Ameixa preta (polpa) (<i>Prunus capuli</i>)⊗	74,9	NE	NE	977	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			DENSIDADE (ρ) (kg m ⁻³)	CAMPO DE APLICAÇÃO	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade (%)	°Brix	pH				
Ameixa preta (polpa) (<i>Prunus capuli</i>) [⊗]	NE	17,3	4,4	1064 1051 1045 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (onde: A= 1034 ; B= 0,263 ; C= 0,561 D= 3,225 ; R ² =0,996)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Ameixa (polpa) (<i>Prunus salicina</i>) [⊗]	88,7	NE	NE	986	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Ameixa (polpa) (<i>Prunus salicina</i>) [⊗]	NE	13,2	3,2	1003 996 985 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (onde: A= 1066 ; B= 0,299 ; C= 1,758 D= 4,985 ; R ² =0,997)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Ameixa (<i>Plunus domestica</i>) (Secagem) ⁽⁵⁾	14,2 18,6 24,5 33,3 38,2 42,1 49,5 55,9 62,3 69,4 74,4 80,4	NE	NE	Peso aparente / Peso real 897 1460 895 1478 864 1422 826 1444 814 1435 829 1370 787 1281 803 1233 757 1234 755 1122 728 1075 707 1043 $\rho_a = 933,9 - 274,4 X_w$ (R ² =0,961) $\rho_r = 1485,5 + 41,8 X_w - 775,6 X_w^2$ (R ² =0,964)	NE	Peso real: Arquimedes; Peso aparente: Baseado no volume aparente.	Gabas et al. (2005)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			DENSIDADE (ρ) (kg m ⁻³)	CAMPO DE APLICAÇÃO	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade (%)	°Brix	pH				
Amora (polpa) (<i>Rubus glaucos</i>)⊗	86,7	NE	NE	960	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Amora (polpa) (<i>Rubus glaucos</i>)⊗	NE	8,8	2,7	964 953 935 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (onde: A= 1078 ; B= 0,452 ; C= 6,875 D= 7,770 ; R ² =0,991)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Banana (polpa) (<i>Musa cavendishii</i>)⊗	75,2	NE	NE	968	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Banana (polpa) (<i>Musa sapientum</i>)⊗	73,3	NE	NE	966	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Banana (polpa) (<i>Musa paradisiaca</i>)⊗	71,0	NE	NE	992	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Banana (polpa) (<i>Musa auriens</i>)⊗	68,1	NE	NE	987	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Banana (polpa) (<i>Musa cavendishii</i>)⊗	NE	3,9	5,6	856 842 82 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (onde: A= 1019 ; B= 0,258 ; C= 4,555 D= 6,293 ; R ² =0,997)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Banana (polpa) (<i>Musa auriens</i>)⊗	NE	4,2	5,1	955 941 923 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (onde: A= 1022 ; B= 0,259 ; C= 3,297 D= 6,760 ; R ² =0,994)	20°C 30°C 40°C	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			DENSIDADE (ρ) (kg m^{-3})	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade (%)	°Brix	pH				
Carambola (polpa) (<i>Carica pentagona</i>)⊗	92,8	NE	NE	963	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Carambola (polpa) (<i>Carica pentagona</i>)⊗	NE	7,5	3,4	1003 996 983 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (onde: A= 1033 ; B= 0,303 ; C= 2,253 D= 4,689 ; R ² =0,992)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Cupuaçu (polpa integral) (<i>Theobroma grandiflorum</i>)	NE	12	NE	1.027,6	30°C	Picnômetro	Araújo, Queiroz e Figueiredo (2004)
Cupuaçu (polpa diluída) (<i>Theobroma grandiflorum</i>)	NE	9	NE	1.017,1	30°C	Picnômetro	Araújo, Queiroz e Figueiredo (2004)
Cupuaçu (polpa peneirada) (<i>Theobroma grandiflorum</i>)	NE	12	NE	1.039,0	30°C	Picnômetro	Araújo, Queiroz e Figueiredo (2004)
Figo in natura (<i>Ficus carica</i> L.) (var. roxo de Valinhos) (no estágio rami, tipo 8)	84,3	NE	NE	815,6 (peso específico real)	5 a 21 °C	Arquimedes	Sarria e Honório (2004)
Graviola (polpa) (<i>Anona muricata</i>)	NE	13,5	NE	$\rho = (1,0312 + 9.10^{-6}.T - 5.10^{-6}.T^2).1000$ (R ² = 0,99)	NE	Picnômetro	Sousa et al. (2000)
Goiaba (polpa) (<i>Psidium guajava</i> L.)⊗	86,4	NE	NE	1006	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Goiaba (polpa) (<i>Psidium guajava</i> L.)⊗	NE	2,6	3,6	1002 994 983 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (onde: A= 1015 ; B= 0,326 ; C= 3,336 D= 4,899 ; R ² =0,990)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Grapefruit (polpa) (<i>Citrus paradisi</i>)⊗	88,3	NE	NE	1003	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			DENSIDADE (ρ) (kg m^{-3})	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade (%)	°Brix	pH				
Grapefruit (polpa) (<i>Citrus paradisi</i>)⊗	NE	8,9	3,1	1015 1009 996 $\rho = A - B(T) + C \times 10^{-3}(T)^2 - D \times 10^{-5}(T)^3$ (A= 1048 ; B= 0,702 ; C= 5,509 D= 5,050 ; R ² =0,996)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Laranja (polpa) (<i>Citrus sinensis</i>)(var.Pera-Rio) suco concentrado (64,2°Brix) não clarificado	34 a 73	NE	NE	$\rho = 1428,5 - 454,9.X_w + 0,231T$ R ² >0,97 Erro:0,1%	0,5°C a 62,0°C	Picnômetro	Telis-Romero et al. (1998)
Laranja (polpa) (<i>Citrus sinensis</i>) ⊗	NE	8,6	3,1	954 943 928 $\rho = A - B(T) + C \times 10^{-3}(T)^2 - D \times 10^{-5}(T)^3$ (onde: A= 1047 ; B= 0,416 ; C= 4,526 D= 5,785 ; R ² =0,992)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Laranja (polpa) (<i>Citrus sinensis</i>) ⊗	85,3	NE	NE	1020	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Limão (polpa) (<i>Citrus aurantifolia</i>)⊗	90,1	NE	NE	967	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Limão (polpa) (<i>Citrus aurantifolia</i>)⊗	NE	7,6	4,8	1007 998 981 $\rho = A - B(T) + C \times 10^{-3}(T)^2 - D \times 10^{-5}(T)^3$ (onde: A= 1031 ; B= 0,357 ; C= 5,275 D= 5,128 ; R ² =0,995)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			DENSIDADE (ρ) (kg m^{-3})	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade (%)	°Brix	pH				
Limão (polpa) (<i>Citrus limon</i>)	NE	8,4	2,2	989 974 958 $\rho = A - B(T) + C \times 10^{-3}(T)^2 - D \times 10^{-5}(T)^3$ (onde: $A = 1046$; $B = 0,778$; $C = 16,325$ $D = 16,810$; $R^2 = 0,989$)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Leite de coco ☉	74,60 a 55,26	NE	NE	969,00 a 983,05 $\rho = 1018 - 31,7.X_F - 0,465.T$ $R^2 = 0,974$; $DP = 0,715$	60°C a 80°C 20-35% gordura	Picnômetro	Tansakul e Chaisawang (2005)
Mangaba (polpa) (<i>hancornia speciosa</i>)	89,49	7,34	4,22	843,0 919,0 935,0 983,0 988,0	-180°C -130°C -90°C -60°C -40°C	Picnômetro	Duarte et al (2003)
Manga (polpa) (<i>Mangifera indica</i> L.)	NE	9,5	NE	$\rho = 1,0446 - 2,2.10^{-4}.T - 1,7.10^{-6}.T^2$ ($R^2 = 0,99$)	NE	Picnômetro	Sousa et al. (2000)
Manga (polpa) integral (<i>Mangifera indica</i> L.) (var. Tomy atkins)	87,03	12,04	4,36	$\rho = 1.050,98 - 0,5600.T + 0,002000.T^2$ ($R^2 = 0,983$)	10°C a 50°C	Picnômetro	Simões (1997)
Manga (polpa) peneirada (<i>Mangifera indica</i> L.) (var. Tomy atkins)	87,05	12,23	4,36	$\rho = 1.041,90 - 0,3113.T - 0,000271.T^2$ ($R^2 = 0,994$)	10°C a 50°C	Picnômetro	Simões (1997)
Manga (polpa) centrifugada (<i>Mangifera indica</i> L.) (var. Tomy atkins)	87,75	12,25	4,36	$\rho = 1.050,68 - 0,0994.T - 0,000143.T^2$ ($R^2 = 0,995$)	10°C a 50°C	Picnômetro	Simões (1997)
Manga (polpa) Concentrada (<i>Mangifera indica</i> L.) (var. Tomy atkins)	68,38	29,52	4,36	$\rho = 1.108,91 - 0,1001.T - 0,002214.T^2$ ($R^2 = 0,998$)	10°C a 50°C	Picnômetro	Simões (1997)
Manga / Pinha e Graviola (polpas)	NE	3,25 a 22	NE	$\rho = 0,002389.^{\circ}B + 1,0109$ ($R^2 = 0,88$)	27°C	Picnômetro	Sousa et al. (2000)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			DENSIDADE (ρ) (kg m^{-3})	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade (%)	°Brix	pH				
Manga (polpa) (<i>Mangifera indica</i>)	NE	18,3	4,7	1070 1063 1053 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (A= 1087 ; B= 1,064 ; C= 21,887 D= 26,160 ; R ² =0,996)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Maçã (polpa) (<i>Malus communis</i>)⊗	86,8	NE	NE	870	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Maçã (polpa) (<i>Malus communis</i>)⊗	NE	11,9	3,2	1025 1022 1009 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (onde: A= 1058 ; B= 0,696 ; C= 14,731 D= 17,112 ; R ² =0,998)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Mamão papaya (polpa) (<i>Carica papaya L.</i>)⊗	NE	11,1	5,3	1016 1006 997 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (A= 1053 ; B= 0,639 ; C= 12,145 D= 13,230 ; R ² =0,994)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Mamão papaya (polpa) (<i>Carica papaya L.</i>)⊗	89,5	NE	NE	965	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			DENSIDADE (ρ) (kg m^{-3})	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade (%)	°Brix	pH				
Maracujá (polpa) (<i>Passiflora edulis</i>)	NE	14,7	2,9	1066 1063 1055 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (A= 1069 ; B= 0,562 ; C= 8,704 D= 11,271 ; $R^2=0,995$)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Maracujá (polpa) (<i>Passiflora mollissima</i>)	NE	10,9	3,2	1049 1044 1036 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (A= 1051 ; B= 0,594 ; C= 9,540 D= 10,213 ; $R^2=0,996$)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Melancia (polpa) (<i>Citrulus vulgaris</i>)⊗	92,6	NE	NE	972	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Melancia (polpa) (<i>Citrulus vulgaris</i>)⊗	NE	7,2	5,4	1018 1013 1006 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (A= 1037 ; B= 0,707 ; C= 19,180 D= 21,445 ; $R^2=0,995$)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Melão (polpa) (<i>Cucumis melo</i>)⊗	93,7	NE	NE	977	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			DENSIDADE (ρ) (kg m^{-3})	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade (%)	°Brix	pH				
Melão (polpa) (<i>Cucumis melo</i>)⊗	NE	3,2	5,7	994 932 917 $\rho = A - B(T) + C \times 10^{-3}(T)^2 - D \times 10^{-5}(T)^3$ (onde: A= 1024 ; B= 0,499 ; C= 13,332 D= 15,380 ; R ² =0,984)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Morango (polpa) (<i>Frangaria vesca</i>)⊗	91,8	NE	NE	963	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Morango (polpa) (<i>Frangaria vesca</i>)⊗	NE	6,7	3,2	998 992 982 $\rho = A - B(T) + C \times 10^{-3}(T)^2 - D \times 10^{-5}(T)^3$ (onde: A= 1035 ; B= 0,387 ; C= 6,600 D= 9,911 ; R ² =0,998)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Morango (polpa) (<i>Frangaria chiloensis</i>)⊗	90,8	NE	NE	927	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Naranjilla (polpa) (<i>Solanum quitoense</i>)⊗	92,0	NE	NE	881	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Naranjilla (polpa) (<i>Solanum quitoense</i>)⊗	NE	7,4	3,2	915 904 887 $\rho = A - B(T) + C \times 10^{-3}(T)^2 - D \times 10^{-5}(T)^3$ (A= 1037 ; B= 0,354 ; C= 2,957 D= 3,729 ; R ² =0,992)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Nectarina (polpa) (<i>Prunus ssp</i>)⊗	86,6	NE	NE	946	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			DENSIDADE (ρ) (kg m^{-3})	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade (%)	°Brix	pH				
Nectarina (polpa) (<i>Prunus ssp</i>)⊗	NE	12,8	3,7	1018 1012 1000 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (onde: A= 1059 ; B= 0,346 ; C= 3,196 D= 4,662 ; R ² =0,994)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Pêssego (polpa) (<i>Prunus pérsica</i>)⊗	87,4	NE	NE	951	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Pêssego (polpa) (<i>Prunus pérsica</i>)⊗	NE	16,1	3,6	1034 1028 1017 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (onde: A= 1078 ; B= 0,426 ; C= 5,941 D= 7,252 ; R ² =0,993)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Pêra (polpa) (<i>Pyrus communis</i>)⊗	82,1	NE	NE	977	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Pêra (polpa) (<i>Pyrus communis</i>)⊗	NE	14,8	4,4	1027 1018 1008 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (A= 1074 ; B= 0,579 ; C= 6,150 D= 6,680 ; R ² =0,949)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Pinha (polpa) (<i>Anona squamosa</i>)	NE	6	NE	$\rho = 1,0385 - 3 \cdot 10^{-4} \cdot T - 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$ (R ² = 0,99)	NE	Picnômetro	Sousa et al. (2000)
Tangerina (polpa) (<i>Citrus reticulata</i>)⊗	87,3	NE	NE	1029	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			DENSIDADE (ρ) (kg m^{-3})	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade (%)	°Brix	pH				
Tangerina (polpa) (<i>Citrus reticulata</i>)⊗	NE	9,4	3,8	990 973 962 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (onde: A= 1043 ; B= 0,335 ; C= 2,333 D= 4,156 ; R ² =0,996)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Umbu (polpa) (<i>Spondias tuberosa</i>)	87,89	10	2,16	1.063,39 1.057,14 1.052,61	20°C 30°C 40°C	Picnômetro	Lima et al (2003)
Umbu (polpa) (<i>Spondias tuberosa</i>)	77,89	20 ⁽¹⁾	2,16	1.097,16 1.093,28 1.088,91	20°C 30°C 40°C	Picnômetro	Lima et al (2003)
Umbu (polpa) (<i>Spondias tuberosa</i>)	67,89	30 ⁽¹⁾	2,16	1.159,80 1.155,37 1.149,91	20°C 30°C 40°C	Picnômetro	Lima et al (2003)
Uva (suco clarificado) (<i>Vitis vinifera</i>) (var: Cereza, Criolla e Moscatel)⊗	NE	22,9 a 70,6	NE	1065,0 a 1358,4 $\rho = 1,0462 \times 10^3 + 1,9630 \times 10^{-1} T + 3,8568 \cdot 10^{-2} T^2 + 1,1973 \times 10^{-3} T^3$ (R ² =0,999)	20°C a 80°C	Picnômetro	Zuritz et al. (2004)
Uva (polpa) (<i>Vitis vinifera</i>)⊗	81,6	NE	NE	981	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Uva (polpa) (<i>Vitis vinifera</i>)⊗	NE	13,9	3,7	1054 1051 1045 $\rho = A - B (T) + C \times 10^{-3} (T)^2 - D \times 10^{-5} (T)^3$ (A= 1072 ; B= 0,331 ; C= 1,018 D= 2,903 ; R ² =0,993)	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)

HORTALIÇAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			DENSIDADE (ρ) (kg m^{-3})	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade (%)	°Brix	pH				
Cebola em fatias (<i>Allium cepa</i> L.) (var: Southport White Globe) ⊗ (secagem)	5,4 a 80	NE	NE	$\rho_a = 1192 - 412 X_w + 1068 X_w^2 - 1065 X_w^3$ $(R^2=0,998)$ $\rho_r = 1427 - 466 X_w$ ($R^2=0,994$) Erro: 0,8%	NE	Peso real: Arquimedes; Peso aparente: Baseado no volume aparente	Rapusas e Driscoll (1995)
Pepino (polpa) (<i>Solanum muricatum</i>) ⊗	83,4	NE	NE	971	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Tomate polpa industrializada	NE	18	NE	1.037,00	NE	Picnômetro	Carbonera et al. (2003)
Tomate (polpa) (<i>Lycopersicon esculentum</i>) ⊗	NE	5,4	4,3	953 945 932 $\rho = A - B(T) + C \times 10^{-3}(T)^2 - D \times 10^{-5}(T)^3$ $(A=1025 ; B=0,536 ; C=11,537$ $D=17,410 ; R^2=0,996)$	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)
Tomate (polpa) (<i>Lycopersicon esculentum</i>) ⊗	94,9	NE	NE	934	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Tomate árvore (polpa) (<i>Cyphomandra betacea</i>) ⊗	87,6	NE	NE	950	40°C	Picnômetro	Alvarado (1994)
Tomate árvore (polpa) (<i>Cyphomandra betacea</i>) ⊗	NE	10,5	3,9	958 946 930 $\rho = A - B(T) + C \times 10^{-3}(T)^2 - D \times 10^{-5}(T)^3$ $(A=1048 ; B=0,463 ; C=10,290$ $D=11,888 ; R^2=0,998)$	20°C 30°C 40°C (10°C a 80°C)	Picnômetro	Alvarado e Romero (1989)

Onde:

NE = Não encontrado;

X_w = teor de umidade;

T = temperatura (°C);

°B = concentração de sólidos solúveis (°Brix);

X_F = teor de gordura;

ρ_a = peso específico aparente;

ρ_r = peso específico real;

⊗ = fonte internacional;

(1) Corresponde a adição de sacarose;

ρ_{H_2O} (27°C) = 996,5 kg m⁻³

ρ_{H_2O} (32°C) = 995,0 kg m⁻³

ρ_{H_2O} (37°C) = 993,3 kg m⁻³

5.7.2. Valores de Calor Específico (Cp) de produtos hortícola

Tabela 33: Valores de calor específico (Cp) de produtos hortícolas.

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			CALOR ESPECÍFICO (Cp) (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹)	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade (%)	°Brix	pH				
Polpa abacate (<i>Persea drymifolia</i>)⊗	74,0 65,4 61,1 44,2	NE	NE	3,39 3,06 2,97 2,39 $C_p=0,92+0,0332.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Polpa ameixa preta (<i>Prunus capuli</i>)⊗	77,5 58,2 47,4 40,6	NE	NE	3,31 2,89 2,47 2,51 $C_p=1,47+0,0237.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Polpa ameixa (<i>Prunus salicina</i>)⊗	88,9 75,0 70,4 67,7	NE	NE	3,68 3,10 2,97 2,81 $C_p=0,11+0,0401.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Polpa amora (<i>Rubus glaucos</i>)⊗	86,5 72,0 66,1 59,4	NE	NE	3,60 3,10 2,89 2,64 $C_p=0,55+0,0353.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Polpa abacaxi (<i>Ananas comosus</i> L.)⊗	84,7 71,0 62,1 46,0	NE	NE	3,48 2,97 2,60 2,39 $C_p=0,98+0,0286.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Polpa banana (<i>Musa cavendishii</i>)⊗	75,6 66,8 59,1 44,7	NE	NE	3,39 3,01 2,85 2,55 $C_p=1,34+0,0262.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			CALOR ESPECÍFICO C_p (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹)	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade(%)	°Brix	pH				
Banana (polpa) (<i>Musa auriens</i>)⊗	68,1 62,1 55,2 39,8	NE	NE	2,97 2,85 2,64 2,26 $C_p = 1,24 + 0,0255.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Banana (polpa) (<i>Musa rosacea</i>)⊗	70,0 65,0 59,4 45,7	NE	NE	2,93 2,85 2,72 2,43 $C_p = 1,48 + 0,0209.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Banana (polpa) (<i>Musa paradisiaca</i>)⊗	73,8 63,6 59,4 49,2	NE	NE	3,35 2,97 2,76 2,47 $C_p = 0,66 + 0,0362.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Cajá (polpa) (<i>Spondias mombin</i> L.)	90,1	9	3,2	$C_p = 2,589 + 0,00247.T - 1,476.10^{-5}.T^2$ ($R^2 = 0,99$)	-18°C a -196°C , 9 °Brix	Misturas	Cavalcanti Mata e Duarte (2003)
Cajá (polpa) (<i>Spondias mombin</i> L.)	90,1	20 ⁽¹⁾	3,2	$C_p = 2,9328 + 0,00213.T - 2,197.10^{-5}.T^2$ ($R^2 = 0,999$)	-18°C a -196°C , 20 °Brix	Misturas	Cavalcanti Mata e Duarte (2003)
Cajá (polpa) (<i>Spondias mombin</i> L.)	90,1	40 ⁽¹⁾	3,2	$C_p = 3,51 + 0,0047.T - 1,81.10^{-5}.T^2$ ($R^2 = 0,998$)	-18°C a -196°C , 40 °Brix	Misturas	Cavalcanti Mata e Duarte (2003)
Cajá (polpa) (<i>Spondias mombin</i> L.)	90,1	60 ⁽¹⁾	3,2	$C_p = 3,723 + 0,00303.T - 2,157.10^{-5}.T^2$ ($R^2 = 0,990$)	-18°C a -196°C , 60 °Brix	Misturas	Cavalcanti Mata e Duarte (2003)
Carambola (polpa) (<i>Carica pentagona</i>)⊗	92,5 88,0 83,5 71,5	NE	NE	3,89 3,56 3,06 2,89 $C_p = - 0,53 + 0,0463.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Cupuaçu polpa integral (<i>Theobroma grandiflorum</i>)	NE	12	NE	3,24 DP=0,02	30°C	Misturas	Araújo, Queiroz e Figueiredo (2004)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			CALOR ESPECÍFICO C_p (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹)	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade(%)	°Brix	pH				
Cupuaçu polpa diluída (<i>Theobroma grandiflorum</i>)	NE	9	NE	3,71 DP=0,04	30°C	Misturas	Araújo, Queiroz e Figueiredo (2004)
Cupuaçu polpa peneirada (<i>Theobroma grandiflorum</i>)	NE	12	NE	3,18 DP=0,01	30°C	Misturas	Araújo, Queiroz e Figueiredo (2004)
“Fruta do cactus” (polpa) (<i>Opuntia tuna</i>) ⊗	84,6 73,6 68,2 53,7	NE	NE	3,64 3,22 3,10 2,85 $C_p=1,45+0,0250.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Goiaba vermelha (suco) (<i>Psidium guajava</i> L.) (var. Beaumont:B-30) ⊗	NE	9 a 11	3,7	3,526 a 3,583 $C_p=(3366,1+2,5536.T)/1000$ (9°Brix) $C_p=(3473,2+0,807.T)/1000$ (11°Brix)	65°C a 85°C	DSC	Zainal et al. (2000)
Goiaba (polpa) (<i>Psidium guajava</i> L.)⊗	86,6 76,7 66,7 50,7	NE	NE	3,56 3,22 2,85 2,51 $C_p=0,97+0,0294.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Graviola / Manga / Pinha	76 a 95	3,25 a 22		$C_p=0,0688.X_w-2,6263$; $R^2=0,903$		Misturas	Sousa et al. (2000)
Grapefruit (polpa) (<i>Citrus paradisi</i>)⊗	88,7 83,5 78,6 63,1 11,4 9,2 1,9 1,4	NE	NE	3,68 3,31 3,10 2,64 1,71 1,55 1,62 1,37 $C_p=1,41+0,0229.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			CALOR ESPECÍFICO C_p (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹)	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade(%)	°Brix	pH				
Laranja (polpa) (<i>Citrus sinensis</i>) ⊗	83,1 76,8 72,4 62,9 10,5 10,1 1,9 1,3	NE	NE	3,52 3,27 3,01 2,68 1,85 1,68 1,78 1,36 $C_p=1,52+0,0219.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Laranja (polpa) (<i>Citrus sinensis</i>) (var.Pera-Rio) suco concentrado (64,2°Brix) não clarificado	34 a 73	NE	NE	$C_p=(1424,34+2673,19.(X_w/100)$ $+2,446T)/1000$ $R^2>0,97$ Erro: 0,1%	0,5°C a 62,0°C	Cilindros coaxiais (Bellet et al. (1975)	Telis-Romero et al. (1998)
Leite de coco ⊗	74,60 a 55,26	NE	NE	3,277 a 3,711 $C_p= 4,018-2,552.X_F +0,003T$ ($R^2=0,911$) DP= 0,047	60°C a 80°C 20-35% gordura	DSC	Tansakul e Chaisawang (2005)
Limão (polpa) (<i>Citrus aurantifolia</i>)⊗	89,9 78,3 64,7 47,3	NE	NE	3,64 3,35 2,76 2,26 $C_p=0,66+0,0334.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Limão (<i>Citrus limon</i>)⊗	11,4 9,4 1,9 1,2	NE	NE	1,70 1,69 1,63 1,45 $C_p=1,51+0,0179.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Maçã (suco clarificado)	NE	6 -75	NE	$C_p=(0,80839-4,3416.10^{-3}°B$ $+5,6063.10^{-4}T).4,1868$	30 – 90°C	DSC	Constenla et al (1989)
Maçã <i>in natura</i> (<i>Malas sp.</i> var.Red) ⊗	NE	NE	NE	3,734	23°C	Campbell et al. (1991) ⁽⁶⁾	Fontana et al. (1999)
Maçã <i>in natura</i> (<i>Malas sp.</i> var.Golden) ⊗	NE	NE	NE	3,812	23°C	Campbell et al. (1991) ⁽⁶⁾	Fontana et al. (1999)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			CALOR ESPECÍFICO C_p (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹)	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade(%)	°Brix	pH				
Maçã (polpa) (<i>Malus communis</i>)⊗	87,6 82,4 75,9 49,7	NE	NE	3,64 3,31 3,27 2,68 $C_p=1,51+0,0232.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Mangaba (polpa) (<i>Hancornia speciosa</i>)	89,49	7,34	4,22	$C_p = 2,1333+0,0140.T + 3,6370.10^{-5}$	-40°C a -180°C , 7,34 °Brix	Moline	Duarte et al (2003)
Mangaba (polpa) (<i>Hancornia speciosa</i>)	89,49	7,34	4,22	$C_p = 1,8844+0,0114.T + 3,0409.10^{-5}$	-40°C a -180°C , 7,34 °Brix	Misturas	Duarte et al (2003)
Manga polpa integral (<i>Mangifera indica</i> L.) (var.Tomy atkins)	87,03	12,04	4,36	$C_{pf} = 3,95$; $C_{pu} = 2,36$	-40°C a 40°C	DSC	Simões (1997)
Manga polpa peneirada (<i>Mangifera indica</i> L.) (var.Tomy atkins)	87,05	12,23	4,36	$C_{pf} = 4,04$; $C_{pu} = 2,49$	-40°C a 40°C	DSC	Simões (1997)
Manga polpa concentrada (<i>Mangifera indica</i> L.) (var.Tomy atkins)	68,38	29,52	4,36	$C_{pf} = 3,59$; $C_{pu} = 2,25$	-40°C a 40°C	DSC	Simões (1997)
Manga polpa centrífuga (<i>Mangifera indica</i> L.) (var.Tomy atkins)	87,75	12,25	4,36	$C_{pf} = 3,96$; $C_{pu} = 2,47$	-40°C a 40°C	DSC	Simões (1997)
Mamão papaya (polpa) (<i>Carica papaya</i> L.)⊗	89,7 77,3 70,7 55,5	NE	NE	3,35 3,31 2,97 2,55 $C_p=1,23+0,0248.X_w$	Teor de umidade >50% (3)	Misturas	Alvarado (1991)
(<i>Parmentiera aculeata</i>) (similar ao maracujá)⊗	83,1 77,8 72,5 54,6	NE	NE	3,39 3,06 2,93 2,39 $C_p=0,55+0,0332.X_w$	Teor de umidade >50% (3)	Misturas	Alvarado (1991)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			CALOR ESPECÍFICO C_p (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹)	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade(%)	°Brix	pH				
Melancia (polpa) (<i>Citrulus vulgaris</i>)⊗	92,0 89,0 76,3 66,8	NE	NE	3,98 3,68 3,18 2,97 $C_p=0,33+0,0385.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Morango (polpa) (<i>Frangaria vesca</i>)⊗	92,0 86,1 78,1 67,1	NE	NE	3,81 3,39 3,22 2,93 $C_p=0,68+0,0329.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Morango (polpa) (<i>Frangaria chiloensis</i>)⊗	90,4 79,7 74,2 65,2	NE	NE	3,68 2,93 2,76 2,64 $C_p= - 0,21+0,0415.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Naranjilla (polpa) (<i>Solanum quitoense</i>)⊗	92,4 82,8 72,8 63,1	NE	NE	3,68 3,31 3,10 2,76 $C_p=0,85+0,0303.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Nectarina (polpa) (<i>Prunus ssp</i>)⊗	86,6 79,9 67,2 44,2	NE	NE	3,6 3,39 3,10 2,6 $C_p=1,56+0,0232.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Pêra (polpa) (<i>Pyrus communis</i>)⊗	81,2 63,1 60,3 33,1	NE	NE	3,52 3,22 3,10 2,43 $C_p=1,70+0,0230.X_w$	Teor de umidade >50% (3)	Misturas	Alvarado (1991)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			CALOR ESPECÍFICO C_p (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹)	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade(%)	°Brix	pH				
Pêssego (polpa) (<i>Prunus pérsica</i>)⊗	87,5 80,0 71,6 56,6 12,6 10,4 2,0 1,3	NE	NE	3,43 3,22 3,10 2,72 1,78 1,71 1,69 1,43 $C_p=1,51+0,0218.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Tangerina (polpa) (<i>Citrus reticulata</i>)⊗	87,0 76,8 64,2 48,3 12,8 10,6 2,0 1,5	NE	NE	3,69 3,18 2,85 2,30 1,83 1,78 1,77 1,47 $C_p=1,52+0,0221.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Umbu (polpa) (<i>Spondias tuberosa</i>)	87,89	10	2,16	3,67	20°C	Misturas	Lima et al (2003)
Umbu (polpa) (<i>Spondias tuberosa</i>)	77,89	20 ⁽¹⁾	2,16	3,48	20°C	Misturas	Lima et al (2003)
Umbu (polpa) (<i>Spondias tuberosa</i>)	67,89	30 ⁽¹⁾	2,16	3,21	20°C	Misturas	Lima et al (2003)
Uva (polpa) (<i>Vitis vinifera</i>)⊗	81,2 70,6 67,1 47,5	NE	NE	3,52 3,14 2,93 2,35 $C_p=0,68+0,0346.X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)

HORTALIÇAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			CALOR ESPECÍFICO C_p (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹)	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade(%)	°Brix	pH				
Cebola em fatias (<i>Allium cepa</i> L.) (var: Southport White Globe) ⊗(secagem)	0 a 69,2	NE	NE	1,82 a 3,45 $C_p = 1,84 + 2,34 X_w$ ($R^2 = 0,983$) Erro: 0,9%	20°C	Misturas	Rapugas e Driscoll (1995)
Cogumelos em pedaços (<i>Pleurotus florida</i>) ⊗(secagem)	10,24 a 89,68	NE	NE	1,7158 a 3,9498 $C_p = 1,0217 + 0,0247 X_w + 0,0092 T$ ($R^2 = 0,989$)	40°C a 70°C	Misturas	Shrivastava e Datta (1999)
Tomate (polpa) (<i>Lycopersicon esculentum</i>) ⊗	94,5 81,6 74,8 64,1	NE	NE	3,94 3,48 3,18 2,93 $C_p = 0,71 + 0,0339 X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)
Tomate árvore (polpa) (<i>Cyphomandra betacea</i>) ⊗	87,4 82,7 73,6 62,7	NE	NE	3,56 3,18 2,97 2,64 $C_p = 0,45 + 0,0344 X_w$	Teor de umidade >50% ⁽³⁾	Misturas	Alvarado (1991)

Onde:

X_w = teor de umidade (%);

T = temperatura (°C);

°B = concentração de sólidos solúveis (°Brix);

X_F = teor de gordura;

⊗ = fonte internacional;

DP = desvio padrão;

DSC = Calorímetro Diferencial de Varredura;

C_{pf} = calor específico abaixo do ponto de congelamento;

C_{pu} = calor específico acima do ponto de congelamento;

(1) Corresponde a adição de sacarose;

(3) Para teores de umidade abaixo de 50% a equação exponencial $C_p = 1,56 e^{0,009446 X_w}$ ($R^2 = 0,977$), se ajusta melhor aos valores experimentais.

(6) Método Dual Needle Heat-Pulse Sensor (DNHP);

5.7.3. Valores de condutividade térmica (k) de produtos hortícolas

Tabela 34: Valores de condutividade térmica (k) de produtos hortícolas.

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k) (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade(%)	°Brix	pH				
Abacate <i>in natura</i> (<i>Persea drymifolia</i>)⊗	64,7	NE	NE	0,429	28°C ρ = 1060	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Abacaxi <i>in natura</i> (<i>Ananas comosus</i> L.)⊗	84,9	NE	NE	0,549	27°C ρ = 1010	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Ameixa <i>in natura</i> (<i>Prunus salicina</i>)⊗	88,6	NE	NE	0,551	26°C ρ = 1130	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Ameixa (<i>Plunus domestica</i>) ⁽⁵⁾ (Secagem de ameixa) ⊗	14,2 18,6 24,5 33,3 38,2 42,1 49,5 55,9 62,3 69,4 74,4 80,4	NE	NE	0,154 0,165 0,181 0,225 0,251 0,276 0,291 0,335 0,350 0,375 0,380 0,400	NE	Gabas et al.(2003)	Gabas et al. (2005)
Banana <i>in natura</i> (<i>Musa sp</i>) ⊗	75,7	NE	NE	0,481	27°C ρ = 980	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Cupuaçu polpa integral (<i>Theobroma grandiflorum</i>)	NE	12	NE	0,44 DP=0,02	30°C	Pela equação de Fourier	Araújo, Queiroz e Figueiredo (2004)
Cupuaçu polpa diluída (<i>Theobroma grandiflorum</i>)	NE	9	NE	0,50 DP=0,01	30°C	Pela equação de Fourier	Araújo, Queiroz e Figueiredo (2004)
Cupuaçu polpa peneirada (<i>Theobroma grandiflorum</i>)	NE	12	NE	0,42 DP=0,01	30°C	Pela equação de Fourier	Araújo, Queiroz e Figueiredo (2004)
Figo <i>in natura</i> (var. roxo de Valinhos) (<i>Ficus carica</i> L.)	84,3	NE	NE	0,52	5 a 21 °C	Fonte linear de calor	Sarria e Honório (2004)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k) (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade(%)	°Brix	pH				
Grapefruit <i>in natura</i> (sem casca) (<i>Citrus paradisi</i>)⊗	90,4	NE	NE	0,549	26°C ρ = 950	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Laranja polpa (<i>Citrus sinensis</i>)(var.Pera-Rio) suco concentrado (64,2°Brix) não clarificado	34 a 73	NE	NE	$k = 0,0797 + 0,5238.X_w + 0,000580T$ $R^2 > 0,97$ Erro:0,1%	0,5°C a 62,0°C	Cilindros coaxiais ⁽⁴⁾	Telis-Romero et al. (1998)
Laranja <i>in natura</i> (<i>Citrus sinensis</i>) (sem casca) ⊗	85,9	NE	NE	0,580	28°C ρ = 1030	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Leite de coco ⊗	74,60 a 55,26	NE	NE	0,425 a 0,590 $k = 0,654 - 0,942.X_F + 0,002T$ ($R^2 = 0,865$) Erro:2,2%	60°C a 80°C 20-35% gordura	Fonte linear de calor	Tansakul e Chaisawang (2005)
Limão <i>in natura</i> (sem casca) (<i>Citrus limon</i>)⊗	91,8	NE	NE	0,525	28°C ρ = 930	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Limão <i>in natura</i> (sem casca) (<i>Citrus aurantifolia</i>)⊗	89,9	NE	NE	0,490	28°C ρ = 1000	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Maçã <i>in natura</i> (<i>Malas sp.</i> var.Red) ⊗	NE	NE	NE	0,46	23°C	Campbell et al. (1991) ⁽⁶⁾	Fontana et al. (1999)
Maçã <i>in natura</i> (<i>Malas sp.</i> var.Golden) ⊗	NE	NE	NE	0,43	23°C	Campbell et al. (1991) ⁽⁶⁾	Fontana et al. (1999)
Maçã <i>in natura</i> (<i>Malas sp.</i> var.Red) ⊗	84,9	NE	NE	0,513	28°C ρ = 840	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Maçã <i>in natura</i> (<i>Malas sp.</i> var.Green) ⊗	88,5	NE	NE	0,422	28°C ρ = 790	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Maçã (polpa) (<i>Malus communis</i>)⊗	78,7	NE	NE	0,549	29°C	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Mamão papaya <i>in natura</i> (Carica papaya L.)	87,73	10 a 12	NE	$k = 0,5326 + 0,00224T$ ($R^2 = 0,9967$) 0,58 a 0,62	20°C a 40°C	Fonte linear de calor	Kurozawa et al (2005)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k) (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade(%)	°Brix	pH				
Manga, pinha, graviola, acerola, mangaba, cajú	71 a 93	3 a 17	NE	$k = 0,0104.X_w - 0,4083$; $R^2=0,933$	NE	Pela equação de Fourier	Sousa et al. (2000)
Manga polpa integral (Mangifera indica L.) (var.Tomy atkins)	87,03	12,04	4,36	0,58		Pela equação de Fourier	Simões (1997)
Manga polpa peneirada (Mangifera indica L.) (var.Tomy atkins)	87,05	12,23	4,36	0,58	NE	Pela equação de Fourier	Simões (1997)
Manga polpa centrifugada (Mangifera indica L.) (var.Tomy atkins)	87,75	12,25	4,36	0,58	NE	Pela equação de Fourier	Simões (1997)
Manga polpa concentrada (Mangifera indica L.) (var.Tomy atkins)	68,38	29,52	4,36	0,51	NE	Pela equação de Fourier	Simões (1997)
Melão, sem casca, pedaço (Cucumis melo) (var. cantaloupe)	92,8	NE	NE	0,571	28°C $\rho = 930$	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Morango in natura (Frangaria vesca)⊗	88,8	NE	NE	0,462	28°C $\rho = 900$	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Nectarina in natura (Prunus spp.)⊗	89,8	NE	NE	0,585	28°C $\rho = 990$	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Pêssego in natura (Prunus persica)⊗	88,5	NE	NE	0,581	28°C $\rho = 930$	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Pêra in natura (Pyrus communis)⊗	86,8	NE	NE	0,595	28°C $\rho = 1000$	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Umbu (polpa) (Spondias tuberosa)	87,89 77,89 67,89	10 20 30	2,16	0,588 0,550 0,499	20°C a 40°C	Pela equação de Fourier	Lima et al (2003)

HORTALIÇAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k) (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade(%)	°Brix	pH				
Batata <i>in natura</i> (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	84,42	NE	NE	0,540		Fonte linear de calor	Park e Leite (2000)
Beterraba (<i>Beta vulgaris</i> L.) ⊗	89,5	NE	NE	0,601	28°C ρ = 1530	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Cebola <i>in natura</i> (<i>Allium cepa</i> L.) ⊗	87,3	NE	NE	0,574	28°C ρ = 970	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Cebola em fatias (<i>Allium cepa</i> L.) (var. Southport White Globe) ⊗(secagem)	24,0 a 80,6	NE	NE	0,29 a 0,51 k = 0,18+0,41X _w (R ² =0,991) Erro:2%	30,7°C a 33,0°C	Fonte linear de calor	Rapusas e Driscoll (1995)
Cenoura (<i>Daucuscarota</i> L) ⊗	90,0	NE	NE	0,605	28°C ρ = 1040	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Cogumelos em pedaços (<i>Pleurotus florida</i>) ⊗(secagem)	10,24 a 89,68	NE	NE	0,2084 a 0,5309 k = 0,151 + 0,0037 X _w + 3,971x10 ⁻⁵ .ρ _a + 2,348x10 ⁻⁴ .T (R ² =0,998)	40°C a 70°C ρ _a de 111,06 a 655,86	Fonte linear de calor	Shrivastava e Datta (1999)
Nabo (<i>Raphanus raphanistrum</i>) <i>in natura</i>	95,85	NE	NE	0,516		Fonte linear de calor	Park e Leite (2000)
Nabo (<i>Raphanus raphanistrum</i>) ⊗	89,8	NE	NE	0,563	28°C ρ = 1000	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Nabo (<i>Raphanus raphanistrum</i>) seco moído	16,08	NE	NE	0,11		Fonte linear de calor	Park e Leite (2000)
Pepino <i>in natura</i> (<i>Solanum muricatum</i>) (Var. Burpee M+M) ⊗	95,4	NE	NE	0,598	28°C ρ = 950	Fonte linear de calor	Sweat (1974)
Polpa Tomate industrializado	NE	18	NE	0,513 (W m ⁻¹ k ⁻¹)		Fonte linear de calor	Carbonera et al. (2003)
Tomate cereja <i>in natura</i> (<i>Lycopersion esculentun</i>) (sonda inserida no eixo central) ⊗	92,3	NE	NE	0,462	28°C ρ = 1010	Fonte linear de calor	Sweat (1974)

HORTALIÇAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k) (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade(%)	°Brix	pH				
Tomate cereja <i>in natura</i> (<i>Lycopersion esculentun</i>) (sonda inserida perpendicular ao eixo central)) ⊗	92,3	NE	NE	0,527	28°C ρ = 1010	Fonte linear de calor	Sweat (1974)

Onde:

X_w = teor de umidade (%);

T = temperatura (°C);

X_F = teor de gordura;

ρ_a = peso específico aparente;

⊗ = fonte internacional;

(1) Corresponde a adição de sacarose;

(4) Método proposto por Bellet et al. (1975)

(5) Na condutividade da ameixa são valores efetivos e está em (W m⁻¹ k⁻¹)

(6) Método Dual Needle Heat-Pulse Sensor (DNHP);

5.7.4. Valores de difusividade térmica (α) de produtos hortícolas

Tabela 35: Valores de difusividade (α) de produtos hortícolas.

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			DIFUSIVIDADE TÉRMICA (α) (m ² s ⁻¹)	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade(%)	°Brix	pH				
Ameixa preta polpa(<i>Prunus capuli</i>)⊗	74,9	NE	NE	1,55 x10 ⁻⁷	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Ameixa (polpa) (<i>Prunus salicina</i>)⊗	88,7	NE	NE	1,49 x10 ⁻⁷	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Ameixa (<i>Prunus domestica</i>) ⁽⁵⁾ (Secagem de ameixa)⊗	14,2 18,6 24,5 33,3 38,2 42,1 49,5 55,9 62,3 69,4 74,4 80,4	NE	NE	0,958 x10 ⁻⁷ 0,948 x10 ⁻⁷ 1,014 x10 ⁻⁷ 1,198 x10 ⁻⁷ 1,281 x10 ⁻⁷ 1,286 x10 ⁻⁷ 1,358 x10 ⁻⁷ 1,386 x10 ⁻⁷ 1,504 x10 ⁻⁷ 1,489 x10 ⁻⁷ 1,531 x10 ⁻⁷ 1,600 x10 ⁻⁷	NE	Dickerson	Gabas et al. (2005)
Abacate (polpa) (<i>Persea drymifolia</i>)⊗	75,9	NE	NE	1,16 x10 ⁻⁷	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Amora (polpa) (<i>Rubus glaucos</i>)⊗	86,7	NE	NE	1,60 x10 ⁻⁷	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Banana (polpa) (<i>Musa cavendishii</i>)⊗	75,2	NE	NE	1,38 x10 ⁻⁷	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Banana (polpa) (<i>Musa sapientum</i>)⊗	73,3	NE	NE	1,33 x10 ⁻⁷	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Banana (polpa) (<i>Musa paradisiaca</i>)⊗	71,0	NE	NE	1,30 x10 ⁻⁷	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Banana (polpa) (<i>Musa auriens</i>)⊗	68,1	NE	NE	1,33 x10 ⁻⁷	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			DIFUSIVIDADE TÉRMICA (α) (m ² s ⁻¹)	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade(%)	°Brix	pH				
Caju (polpa)	90,4	5 -25	3,88	$\alpha = 1,45751 \times 10^{-7} - 0,00558 \times 10^{-7} \text{°B}$	30°C	Fonte linear de calor	Azoubel et al. (2005)
Carambola (polpa) (<i>Carica pentagona</i>)⊗	92,8	NE	NE	$1,30 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Cupuaçu polpa diluída (<i>Theobroma grandiflorum</i>)	NE	9	NE	$1,32 \times 10^{-7}$	25 a 60°C	Dickerson	Araújo, Queiroz e Figueiredo (2004)
Cupuaçu polpa peneirada (<i>Theobroma grandiflorum</i>)	NE	12	NE	$1,27 \times 10^{-7}$	25 a 60°C	Dickerson	Araújo, Queiroz e Figueiredo (2004)
Cupuaçu polpa integral (<i>Theobroma grandiflorum</i>)	NE	12	NE	$1,31 \times 10^{-7}$	25 a 60°C	Dickerson	Araújo, Queiroz e Figueiredo (2004)
Figo <i>in natura</i> (<i>Ficus carica</i> L.) (var. roxo de Valinhos) (no estágio rami, tipo 8)	84,3	NE	NE	$1,56 \times 10^{-7}$	5 a 21 °C	Fonte linear de calor	Sarria e Honório (2004)
“Fruta do cactus”(polpa) (<i>Opuntia tuna</i>) ⊗	83,6	NE	NE	$1,43 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Grapefruit (polpa) (<i>Citrus paradisi</i>)⊗	88,3	NE	NE	$1,30 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Grapefruit (polpa) (<i>Citrus paradisi</i>)⊗	88,3	NE	NE	$1,30 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Goiaba (polpa) (<i>Psidium guajava</i> L.)⊗	86,4	NE	NE	$1,40 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Laranja (polpa) (<i>Citrus sinensis</i>) ⊗	85,3	NE	NE	$1,56 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Limão (polpa) (<i>Citrus aurantifolia</i>)⊗	90,1	NE	NE	$1,32 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			DIFUSIVIDADE TÉRMICA (α) (m^2s^{-1})	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade(%)	°Brix	pH				
Leite de coco ⊗	74,60 a 55,26	NE	NE	$1,325 \text{ a } 1,634 \times 10^{-7}$ $\alpha \times 10^7 = 0,973 + 0,759 \cdot X_F$ $+ 0,013T - 0,036X_F T$ $R^2=0,7$ Erro: $0,7 \times 10^{-6}\%$	60°C a 80°C 20-35% gordura	Pela equação de Fourier	Tansakul e Chaisawang (2006)
Manga, pinha, graviola, acerola, mangaba, cajá	71 a 93	3 a 17		$\alpha = 0,0204 \cdot X_w + 0,0878 \cdot 10^{-7}$; ($R^2=0,933$)	NE	Dickerson	Sousa et al. (2000)
Maçã in natura (Malas sp.var.Red) ⊗	NE	NE	NE	$1,33 \times 10^{-6}$	23°C	Campbell et al. (1991)(6)	Fontana et al. (1999)
Maçã in natura (Malas sp.var.Golden) ⊗	NE	NE	NE	$1,31 \times 10^{-6}$	23°C	Campbell et al. (1991)(6)	Fontana et al. (1999)
Maçã (polpa) (<i>Malus communis</i>)⊗	86,8	NE	NE	$1,30 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Manga polpa peneirada (<i>Mangifera indica</i> L.) (var.Tomy atkins)	87,05	12,23	4,36	$1,38 \times 10^{-7}$	25 a 50°C	Dickerson	Simões (1997)
Manga polpa centrifugada (<i>Mangifera indica</i> L.) (var.Tomy atkins)	87,75	12,25	4,36	$1,39 \times 10^{-7}$	25 a 50°C	Dickerson	Simões (1997)
Manga polpa integral (<i>Mangifera indica</i> L.) (var.Tomy atkins)	87,03	12,04	4,36	$1,41 \times 10^{-7}$	25 a 50°C	Dickerson	Simões (1997)
Manga polpa concentrada (<i>Mangifera indica</i> L.) (var.Tomy atkins)	68,38	29,52	4,36	$1,28 \times 10^{-7}$	25 a 50°C	Dickerson	Simões (1997)
Mamão papaya in natura (<i>Carica papaya</i> L.)	87,73	10 a 12	NE	$1,03 \text{ a } 1,18 \times 10^{-7}$ $\alpha = 8,69 \times 10^{-8} + 7,71 \times 10^{-10} T$ $(R^2=0,9917)$	20°C a 40°C	Fonte linear de calor	Kurozawa et al (2005)
Mamão papaya polpa (<i>Carica papaya</i> L., var. Solo)⊗	87,6	NE	NE	$1,52 \times 10^{-7}$ DP=0,11	42,8°C	Dickerson	Hales (1984)
Mamão papaya polpa (<i>Carica papaya</i> L.)⊗	89,5	NE	NE	$1,33 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)

FRUTAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			DIFUSIVIDADE TÉRMICA (α) (m^2s^{-1})	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade(%)	°Brix	pH				
Sementes de Mamão papaya (<i>Carica papaya</i> L., var. Solo)⊗	NE	NE	NE	$1,60 \times 10^{-7}$ DP=0,165	42,8°C	Dickerson	Hales (1984)
Melancia (polpa) (<i>Citrulus vulgaris</i>)⊗	92,6	NE	NE	$1,37 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Melão (polpa) (<i>Cucumis melo</i>)⊗	93,7	NE	NE	$1,59 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Morango (polpa) (<i>Frangaria vesca</i>)⊗	91,8	NE	NE	$1,47 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Morango (polpa) (<i>Frangaria chiloensis</i>)⊗	90,8	NE	NE	$1,30 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Naranjilla (polpa) (<i>Solanum quitoense</i>)⊗	92,0	NE	NE	$1,31 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Nectarina (polpa) (<i>Prunus</i> spp)⊗	86,6	NE	NE	$1,42 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Pêssego (polpa) (<i>Prunus pérsica</i>)⊗	87,4	NE	NE	$1,57 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Pêra (polpa) (<i>Pyrus communis</i>)⊗	82,1	NE	NE	$1,61 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Tangerina (polpa) (<i>Citrus reticulata</i>)⊗	87,3	NE	NE	$1,31 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Uva (polpa) (<i>Vitis vinifera</i>)⊗	81,6	NE	NE	$1,25 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Umbu (polpa) (<i>Spondias tuberosa</i>)	87,89	10	2,16	$1,52 \times 10^{-7}$	10°Brix	Dickerson	Lima et al (2003)
Umbu (polpa) (<i>Spondias tuberosa</i>)	77,89	20(1)	2,16	$1,45 \times 10^{-7}$	20°Brix	Dickerson	Lima et al (2003)
Umbu (polpa) (<i>Spondias tuberosa</i>)	67,89	30(1)	2,16	$1,35 \times 10^{-7}$	30°Brix	Dickerson	Lima et al (2003)

HORTALIÇAS	PROPRIEDADES FÍSICAS			DIFUSIVIDADE TÉRMICA (α) (m ² s ⁻¹)	LIMITAÇÕES	MÉTODO	REFERÊNCIA
	Teor de Umidade(%)	°Brix	pH				
Tomate polpa (<i>Lycopersicon esculentum</i>)⊗	94,9	NE	NE	$1,50 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Tomate árvore polpa (<i>Cyphomandra betacea</i>)⊗	87,6	NE	NE	$1,38 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Pepino (polpa) (<i>Solanum muricatum</i>)⊗	83,4	NE	NE	$1,32 \times 10^{-7}$	20°C a 65°C	Dickerson	Alvarado (1994)
Cebola em fatias (cultivar: Southport White Globe) ⊗(secagem)	24,0 a 80,6	NE	NE	$0,90 \times 10^{-7}$ a $1,29 \times 10^{-7}$ $\alpha = 0,70 \times 10^{-6} + 0,75 \times 10^{-6} \cdot X_w$ (R ² =0,979) Erro: 2,6 %	NE	Pela equação de Fourier	Rapusas e Driscoll (1995)

Onde:

X_w = teor de umidade (%);

T = temperatura (°C);

°B = Brix (teor de sólidos solúveis)

X_F = teor de gordura;

⊗ = fonte internacional;

(1) Corresponde a adição de sacarose;

(5) Na condutividade da ameixa são valores efetivos (W m⁻¹ K⁻¹)

(6) Método Dual Needle Heat-Pulse Sensor (DNHP);

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Conclusões:

- Dos resultados experimentais, elaboraram-se 3 tabelas com os valores das propriedades termofísicas separados por: frutas *in natura*, polpas de fruta e hortaliças *in natura*.

- Dos resultados da revisão bibliográfica, criaram-se 4 tabelas separadas por propriedades termofísicas, para valores de densidade, calor específico, condutividade e difusividade térmica.

- Na compilação de propriedades termofísicas apresentada, constatou-se que existem muito mais dados referentes a frutas e polpas de frutas que de hortaliças *in natura*. No total, foram encontrados dados de trinta e um tipos de frutas e apenas nove relacionados a hortaliças.

- A maior parte dos dados encontrados são provenientes de trabalhos desenvolvidos em outros países, comprovando-se que há uma carência de dados nacionais.

- Os modelos usados para determinação das densidades de frutas e hortaliças forneceram ajustes adequados aos resultados experimentais, com erros percentuais máximos em torno de 1,7%.

- Foi possível observar que existe uma relação direta entre a densidade e a concentração de sólidos solúveis de todas as polpas de frutas usadas neste trabalho.

- Foi proposta uma equação (48) em função do teor de sólidos solúveis para prever a densidade de polpas de frutas entre 10°Brix e 18°Brix a 30°C com um coeficiente de correlação de 0,9132.

- As médias experimentais dos valores de difusividade térmica das polpas de tangerina e de caju apresentaram-se muito próximas às determinadas por outros autores.

- O valor experimental do calor específico para polpa de tangerina, de $4,05 \text{ kJ kg}^{-1}\text{C}^{-1}$, determinado neste trabalho, aproximou-se muito dos apresentados na literatura. Os valores experimentais que mais se aproximaram aos dos modelos propostos para cálculo de calor específico foram os de tangerina e de acerola, com erros percentuais máximos de 9,03%.

- As médias dos valores experimentais de condutividade térmica variaram entre $0,286 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ (para berinjela) e $0,605 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ (para caju). Com exceção da berinjela, os valores

experimentais de condutividade térmica de cebola e mamão, estão próximos de valores determinados por outros autores.

- Os valores obtidos de condutividade térmica para berinjela, apresentaram-se bem abaixo dos valores médios experimentais para os demais produtos hortícolas, isto pode estar relacionado à sua estrutura porosa (armazenamento de ar no seu interior), já que a condutividade térmica dos gases é menor que a dos líquidos.

- Os valores médios de condutividade térmica calculados pela aproximação geral da Equação de Fourier que relaciona, a difusividade, a condutividade térmica e o calor específico apresentaram-se entre $0,495 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ (para tangerina) e $0,842 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ (para maracujá). Com exceção da polpa de maracujá, os valores de condutividade térmica calculados mantiveram-se dentro de uma faixa de valores esperada. O valor teórico para polpa de tangerina, de $0,490 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, determinado por Alvarado (1994), pela aproximação geral da Equação de Fourier, é muito próximo ao experimental obtido neste trabalho: $0,495 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. Os resultados oscilaram de 1,04% para acerola, até 12,89% para maracujá. Concluiu-se que a determinação indireta da condutividade térmica, através da relação das outras propriedades, gera mais erro que a determinação experimental direta.

- Os valores de condutividade térmica de caju *in natura* e de sua polpa, obtidos pelo Método da Fonte Linear de Calor (Sonda) e pela aproximação geral da Equação de Fourier, respectivamente, evidenciaram que os métodos são equivalentes e que o caju *in natura* e sua polpa apresentam condutividades térmicas muito semelhantes.

- Os dados compilados e os obtidos experimentalmente, foram introduzidos em uma ferramenta computacional de apoio à pós-colheita e está disponibilizado para a comunidade através de um link na página web da FEAGRI.

Sugestões:

Para trabalhos futuros será interessante:

- Determinar experimentalmente valores de propriedades termofísicas de hortaliças *in natura*, atualmente inexistentes na literatura.

- Estudar a relação da condutividade térmica de frutas e hortaliças, com a porosidade, como nos casos de maçã e berinjela, entre outras.

- Realizar experimentos que possibilitem verificar a existência ou não de diferenças entre os valores de propriedades termofísicas de amostras *in natura* e de suas respectivas polpas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARADO, J. D. **Specific heat of dehydrated pulps of fruits.** *Journal of Food Process Engineering*, Connecticut, v.14, p.189-195, 1991.

ALVARADO, J. D. **Propriedades físicas de frutas. IV Difusividade y conductividad termica efectiva de pulpas. (Physical properties of fruits. IV. Effective thermal diffusivity and conductivity of pulps).** *Latin American Applied research*, v. 24, p. 41-47, 1994.

ALVARADO, J. D; ROMERO, C. H. **Physical properties of fruits I-II. Density and viscosity of juices as functions of soluble solids content and temperature.** *Latin American Applied Research*, v19, p. 15-21, 1989.

ARAÚJO, J. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIREDO, R. M. F. **Propriedades termofísicas de polpa de cupuaçu com diferentes teores de sólidos.** *Revista ciência e agrotecnologia*, Lavras, v. 28, n. 1, p. 126-134, jan/fev., 2004.

ASHRAE. **Refrigeration Handbook. Commodity Storage Requirements.** Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 1994. Chapter 25. p. 25.2-25.5

AZOUBEL, P. M.; CIPRIANI, D. C.; EL-AOUAR, A. A.; ANTONIO, G. C.; MURR, F. E. **X. Effect of concentration on the physical properties of cashew juice.** *Journal of Food Engineering*, v. 66, p. 413-417, 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 07 dez.2005.

CARBONERA, L.; CARCIOFI, B. M.; HUBER, E.; LAURINDO, J. B. **Determinação experimental da difusividade térmica de uma massa de tomate comercial**. Brazilian Journal of Food Technology, v.6, n.2, p. 285-290, jul./dez., 2003.

CEPEA-USP/CNA. **Agronegócio fecha 2006 com pequeno crescimento**. Disponível em: <http://www.cepea.esalq.usp.br/pib/files/2006/12jan_dez.pdf?> Acesso em 22 jun 2007.

CHOI, Y.; OKOS, M. R. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. In: **Food Engineering and Process Applications, Vol 1. Transport Phenomena**. Ed by M. LE. Maguer & P. Jelen, Great Britain, London, Elsevier Applied Science Publishers, 1986, p. 93-101.

CHOI, Y.; OKOS, M. R. Thermal properties of liquid foods- Review. In: **Physical and Chemical properties of Food**. Ed by M. R. Okos, Biochemical and Food process Engineering, Perdue University, West Lafayette, Indiana, USA, 1986, p. 43.

CONSTENLA, D. T.; LOZANO, J. E.; CRAPISTE, G. H. **Thermophysical properties of Clarified Apple Juice as a Function of Concentration and Temperature**. Journal of Food Science, v. 54, n.3, p. 663-668, 1989.

DICKERSON, R. W. **An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods**. Food Technology, v.52, p. 880-886, 1965.

DUARTE, M. E. M.; MATA, M. E. R. M. C.; PAIVA, B. R. **Propriedades termofísicas da polpa de mangaba a baixas e ultra-baixas temperaturas: densidade e calor específico**. Revista Brasileira de Produtos agroindustriais, Campina Grande, Especial, n .1, p. 19-29, 2003.

FAO. **FAOSTAT – Database**. Disponível em: <<http://apps.fao.org>. Acesso em 07, dez, 2005.

FONTANA, A. J.; VARITH, J.; IKEDIALA, J.; REYES, J.; WACKER, B. **Thermal properties of selected foods using a dual needle heat-pulse sensor.** ASAE/CSAE- SCGR Annual International Meeting, Paper n. 996063, 1999.

FREIRE, E. S. **Thermal properties of dry cocoa beans.** 122 p. Dissertação (M.Sc. Thesis) Cranfield Institute of Technology – National College of Agricultural Engineering, 1981, apud PARK, K. J.; MURR, F. E. X.; SALVADEGO, M. **Medição da condutividade térmica de milho triturado pelo método da sonda.** Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.17 (3), p.242-247, set-dez., 1997.

FREIRE, E. S. **Thermal properties of dry cocoa beans.** 122 p. Dissertação (M.Sc. Thesis) Cranfield Institute of Technology – National College of Agricultural Engineering, 1981, apud NUNES, A. S.; PARK, K. J.; DAL FABRO, I. M.; PARK, K. J. B.; BROD, P. R. **Métodos de determinação experimental da condutividade e difusividade térmica de materiais biológicos- Revisão.** Boletim SBCTA, Campinas, v.36 (1), p. 55-68, jan.-jun, 2002.

GABAS, A. L.; MARRA-JUNIOR, W. D.; TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N. **Changes of density, thermal conductivity, and specific heat of plumes during drying.** International Journal of Food Properties, v. 8. p. 233-242, 2005.

HAYES, C. F. **Thermal diffusivity of papaya fruit (Carica papaya L., Var. Solo).** Journal of Food Science, v. 49, p. 1219-1221, 1984.

IBGE. Produção Agrícola. Disponível em: Site Sistema IBGE de recuperação automática – SIDRA (2001): <<http://www.sidra.ibge.gov.br/cgi-bim/v/m/pamltap>> acesso em 07 de dez, 2005.

KAZARIAN, E. A.; HALL, C. W. **Thermal properties of grain.** Transactions of the ASAE, St. Joseph, v. 8, n.1, p.33-48, 1965 apud NUNES, A. S.; PARK, K. J.; DAL FABRO, I. M.; PARK, K. J. B.; BROD, P. R. **Métodos de determinação experimental**

da condutividade e difusividade térmica de materiais biológicos- Revisão. Boletim SBCTA, Campinas, v.36 (1), p. 55-68, jan.-jun, 2002.

KUROZAWA, L. E. ; EL-AOUAR, A. A.; SIMÕES, M. R.; AZOUBEL, P. M.; MURR, F. E. X. Determinação of termal conductivity and termal diffusivity of papaya (*carica papaya* L.) as a function of temperature. In: 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering; 4th Mercosur Congress on Systems Engineering, 2005, Costa Verde, RJ.**Anais...**Costa Verde, 2005.

LENTZ, C. P. **Thermal Conductivity of Meats, Fats, Gelatin Gels, and Ice.** Food Technology, v.15, p. 243-247, 1961.

LEWIS, M. J. **Physical Properties of Foods and Food Processing Systems.** England: Ed Ellis Horwood, 1987.

LIMA, I. J. E.;QUEIROZ, A. J. M.;FIGUEIREDO, R. M. F. **Propriedades termofísicas da polpa de umbu.** Revista Brasileira de Produtos agroindustriais, Campina Grande, Especial, n .1, p. 31-42, 2003.

MATA, M. E. R. M. C.;DUARTE, M. E. M. **Calor específico da polpa de cajá a temperaturas criogênicas e diferentes concentrações de sólidos solúveis: métodos das misturas.** Revista Brasileira de Produtos agroindustriais, Campina Grande, Especial, n .1, p. 1-7, 2003.

MILES, C, A.; Van BEEK, G.;VEERKAMP, C. H. Calculation of thermophysical properties of foods. In: **Physical properties of foods:** Ed by Jowitt, R; Escher, F; Hallström, B; Meffert, H. F. Th; Spiess, W. E. L; Vos, G. , London and New York, Applied Science Publishers, p. 269-312, 1983.

MOHSENIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials.** New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1980.

MOURA, S. C. S. R.; FRNÇA, V. C. L.; LEAL, A. M. C. B. **Propriedades termofísicas de soluções similares a sucos – parte I.** Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v.23, p.62-68, jan.-abr., 2003.

NUNES, A. S.; PARK, K. J.; DAL FABBRO, I. M.; PARK, K. J. B.; BROD, P. R. **Métodos de determinação experimental da condutividade e difusividade térmica de materiais biológicos- Revisão.** Boletim SBCTA, Campinas, v.36 (1), p. 55-68, jan.-jun, 2002.

OHLSSON, T. The Measurement of Thermal Properties. In: **Physical properties of foods:** Ed by Jowitt, R; Escher, F; Hallström, B; Meffert, H. F. Th; Spiess, W. E. L; Vos, G. , London and New York, Applied Science Publishers, p. 313-326, 1983..

OTTEN, L. **Determination of heat transfer using frequency response analysis.** Canadian Agricultural Engineering, v. 16, n.02, p.103-106, 1974 apud PARK, K. J.; MURR, F. E. X.; SALVADEGO, M. **Medição da condutividade térmica de milho triturado pelo método da sonda.** Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.17 (3), p.242-247, set-dez., 1997.

PARK, K. J.; MURR, F. E. X.; SALVADEGO, M. **Medição da condutividade térmica de milho triturado pelo método da sonda.** Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.17 (3), p.242-247, set-dez., 1997.

PARK, K. J.; ITO, A. P.; LEITE, J. T. C. **Influência da granulometria, do diâmetro e do comprimento de amostras de grãos triturados de soja na determinação de coeficientes simultâneos de transferência.** Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.22 (2), p.136-142, maio-agosto., 2002.

PEREIRA, E.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIREDO, R. M. F. **Massa específica de polpa de açaí em função do teor de sólidos totais e da temperatura.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.6, n .3, p. 526-530, 2002.

RAPUSAS, R. S.; DRISCOLL, R. H. **Thermophysical properties of Fresh and Dried white Onion Slices**. Journal of Food Engineering, Great Britain, v. 24, p. 149-164, 1995.

SARRIA, S. D.; HONÓRIO, S. L. **Condutividade e difusividade térmica do figo (*ficus carica* L.) “Roxo de Valinhos”**. Jornal da associação brasileira de engenharia agrícola, Jaboticabal, v.24, n.1, p.185-194, jan./abr., 2004.

SHRIVASTAVA, M.; DATTA, A. K. **Determination of heat and thermal conductivity of mushrooms (*Pleurotus florida*)**. Journal of Food Engineering, Great Britain, v. 39, p. 255-260, 1999.

SILVA, S. B. **Propriedades Termofísicas da Polpa de Abacaxi**. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

SIMÕES, R. M. **Propriedades Termofísicas da Polpa de Manga** 73p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

SINGH, R. P. **Thermal diffusivity in food processing**. Food Technology, v.36 (2), p.87-91, fev., 1982.

SOUSA, E. M. B. D. et al. Propriedades termofísicas de polpas de frutas tropicais. In: XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química; XIX Interamerican Congress of Chemical Engineering; I Brazilian Congress of Phase Equilibrium and Fluid properties for Chemical Process Design, 2000, Águas de São Pedro, SP. **Anais...Águas de São Pedro, 2000**. 1 CD-ROM.

SWEAT, V. E. **Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables**. Journal of Food Science, v. 39, p. 1080-1083, 1974.

SWEAT, V. E. Thermal properties of foods. In: **Engineering properties of foods**. Ed by

SWEAT, V. E. .Thermal properties of foods. In: **Engineering properties of foods**. Ed by M. A. Rao & S. S. H. Rizvi (2ª ed). New York, USA, Marcel Dekker, 1995, p. 126 apud TANSAKUL, A.;CHAI SAWANG, P. **Thermophysical properties of coconut milk**. Journal of Food Engineering, Great Britain, v. 73, p. 276-280, 2006.

TANSAKUL, A.;CHAI SAWANG, P. **Thermophysical properties of coconut milk**. Journal of Food Engineering, Great Britain, v. 73, p. 276-280, 2006.

TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L.; YAMASHITA, F. **Thermophysical Properties of Brazilian Orange Juice as Affected by Temperature and Water Content**. Journal of Food Engineering, Great Britain, v.38, p. 27-40, 1998.

USP. Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (Projeto integrado de composição de Alimentos): <http://www.fcf.usp.br/tabela/> acesso em 07 de dez, 2005.

VILELA, P. S. **Gestão, produtividade e qualidade são fatores críticos para produção de frutas**. Disponível em: <http://www.faeng.org.br/arquivos/Gestao,%20produtividade%20e%20qualidade%20sao%20fatores%20criticos%20para%20producao%20de%20frutas.pdf> > Acesso em 22 jun, 2007.

ZAINAL, B. S.; RAHMAN, R. A.; ARIFF, A. B.; SAARI, B. N.; ASBI, B. A. **Effects of temperature on the physical properties of pink guava juice at two different concentrations**. Journal of Food Engineering, Great Britain, v. 43, p. 55-59, 2000.

ZURITZ, C. A.; PUNTES. E. M.; MATHEY. H. H.; PÉREZ, E. H.; GASCÓN, A.; RUBIO, L. A.; CARULLO, C. A.; CHERNIKOFF, R. E.; CABEZA, M. S. **Density, viscosity and coefficient of thermal expansion of clear grape juice at different soluble solid concentrations and temperatures**. Journal of Food Engineering, Great Britain, v. 71, p. 143-149, 2005.

ANEXO 1

Análise Estatística

Neste trabalho, as variáveis de resposta foram quatro (propriedades termofísicas): densidade, difusividade, condutividade e calor específico. Também foram determinados o teor de umidade e o ° Brix, com três repetições para cada experimento.

Para todos os experimentos calculou-se a média o desvio padrão o coeficiente de variação e as suas incertezas e seus resultados foram comparados aos valores de literatura com seus erros relativos.

Foram realizados 195 tratamentos especificados a seguir:

- Polpas de frutas:

Número de amostras: acerola, caju, graviola, maracujá e tangerina (5).

Propriedades: densidade, difusividade térmica e calor específico (4)

Número de repetições: 3

Total de experimentos: $5 \times 4 \times 3 = 60$ experimentos.

- Frutas e hortaliças *in natura*:

Número de amostras: abóbora, berinjela, cebola, chuchu, banana (ensaio 1), banana (ensaio 2), caju, mamão (ensaio 1), mamão (ensaio 2), manga (10 amostras).

Propriedades: umidade (1)

Número de repetições: 3

Total de experimentos: 30 experimentos.

- Número de repetições para condutividade térmica de frutas e hortaliças *in natura*:

- Abóbora: 12

- Berinjela: 13

- Cebola: 12

- Chuchu: 14

- Banana (ensaio 1): 9

- Banana (ensaio 2): 5

- Caju: 10

- Mamão (ensaio 1): 6

- Mamão (ensaio 2): 12

- Manga: 12

Total de experimentos: 105

Foi aplicado um delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), especificamente, para comparação da condutividade térmica do caju a fim de comparar os resultados entre polpa e produto *in natura* e ver se existe influência significativa entre eles. Os resultados obtidos foram analisados através da análise de variância (ANOVA), para um nível de significância estatístico de 5%. As médias foram comparadas através do teste de Tukey.

Com os valores da difusividade térmica, densidade e calor específico experimentais, foram determinadas as condutividades térmicas da polpa de caju através da aproximação geral da Equação de Fourier (A). A condutividade térmica do caju *in natura*, foi determinada pelo Método da Fonte Linear de Calor (B). Foram realizadas três repetições para o tratamento A e 10 repetições para o tratamento B