



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA  
ÁREA DE ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO  
DE PRODUTOS AGRÍCOLAS



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

TÍTULO

**Cinética de resfriamento e caracterização física da  
manga (*Mangífera indica L.*) variedade Tommy Atkins**

**Aluno**

José Cleidimário Araújo Leite

**Orientadores**

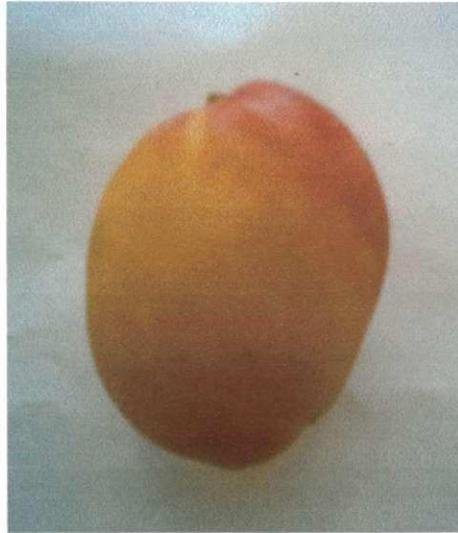
Profª. Dra. Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia

Prof. Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida

Campina Grande - Paraíba

Fevereiro - 2005

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Cinética de resfriamento e caracterização física da  
manga (*Mangífera indica L.*) variedade Tommy Atkins**

**José Cleidimário Araújo Leite**

Campina Grande - Paraíba

Fevereiro - 2005

**José Cleidimário Araújo Leite**

**Cinética de resfriamento e caracterização física da  
manga (*Mangífera indica L.*) variedade Tommy Atkins**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação  
em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de  
Campina Grande, em cumprimento às exigências  
para obtenção do grau de Mestre.

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:** Armazenamento e Processamento de Produtos  
Agrícolas

**ORIENTADORES:**

Profa. Dra. Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia

Prof. Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida

Campina Grande - Paraíba

Fevereiro - 2005

**DIGITALIZAÇÃO:**  
**SISTEMOTECA - UFCG**

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG**

L533c Leite, José Cleidimário Araújo  
2005 Cinética de resfriamento e caracterização física da manga (*Mangífera indica* L.) variedade Tommy Atckins / José Cleidimário Araújo Leite. - Campina Grande, 2005.  
107f. il.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Orientador: Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia e Francisco de Assis Cardoso Almeida.

1 - Manga - Resfriamento 2 - Manga - Caracterização Física 3 - Resfriamento de Frutas I - Título

CDU 634.441:664.8 (043)



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

**JOSÉ CLEIDIMÁRIO ARAÚJO LEITE**

**CINÉTICA DE RESFRIAMENTO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA  
MANGA (*Mangifera indica* L.) VARIEDADE Tommy Atkins**

BANCA EXAMINADORA

PARECER

Josivanda P. Gomes de Gouveia  
Dra. Josivanda Palmeira G. Gouveia-Orientadora

APROVADO COM DISTINÇÃO

Dr. Francisco de Assis C. Almeida-Orientador

Aprovado com distinção

Dra. Bárbara Janet Teruel Mederos-Examinadora

APROVADO C. DISTINÇÃO

Dr. Alexandre José de M. Queiroz-Examinador

APROVADO C/ DISTINÇÃO

FEVEREIRO - 2005

# DEDICATÓRIA

*“Entrega o teu caminho ao Senhor e Ele tudo fará.”*

*Salmo 35:7*

*A Deus*

*Aos meus pais, Francisca Araújo Leite e João Alves Leite*

*Aos meus irmãos, Cleidiana, Cleidivan, Cleidinaldo,*

*Claudiana, Cecília e Carlos Eduardo*

*Aos sobrinhos, Jéssica e Lucas*

*A Ionaldo (in memoriam)*

*Aos meus avós*

*Aos poetas*

*A Eu.....*

*Dedico.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelos milagres que Ele tem sempre realizado na minha vida, por iluminá-la e por ensinar-me o caminho da verdade. Por tudo, simplesmente...

Aos meus pais, Francisca Araújo Leite e João Alves Leite, meus irmãos, sobrinhos e a todos da minha família, pelo apoio, incentivo e ajuda, sempre presentes.

Aos professores orientadores, Doutora Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia e Doutor Francisco de Assis Cardoso Almeida, pela orientação permanente, pelos ensinamentos diversos, companheirismo e amizade sempre dispostos no decorrer dos cursos de Graduação e Pós-Graduação.

Ao professor Doutor Mário Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata, pela atenção e colaboração na orientação deste trabalho.

Aos meus amigos, especialmente a Adriano, Ailton, Ariosvaldo, Edmilson, Fátima, Iacer, Jedman, Josivanda, Luciana, Manassés, Michele, Nicássia, Patrícia, Raniério, Ricardo, Ridelson, Rose, Sckaymenn, Severino Carlos e Sueny, pela amizade e fraternidade compartilhados.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

A todos os professores do Curso de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, em especial aos da Área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, por todos os ensinamentos.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial a Dona Rivanilda e Francisco das chagas Medeiros (in memorian), pela amizade, carinho e atenção sempre prestados.

A Eulália Bezerra Araújo, por ter estado do meu lado no momento que mais necessitei e por ensinar-me que os sonhos são possíveis, mesmo que não sejam permanentes...

# ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>v</b>
<b>RESUMO</b>	<b>vii</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>viii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Objetivos</b>	<b>3</b>
1.1.1. Geral	3
1.1.2. Específicos	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Manga</b>	<b>4</b>
2.1.1. Histórico	4
2.1.2. Aspectos agronômicos	4
2.1.3. Produção no Brasil e no mundo	6
2.1.4. Importância econômica	9
2.1.5. A variedade Tommy Atkins	9
<b>2.2. Características físicas</b>	<b>10</b>
2.2.1. Dimensões	10
2.2.2. Massa	11
2.2.3. Volume	11
2.2.4. Massa específica	11
2.2.5. Conteúdo de água	12
2.2.6. Circularidade	14
2.2.7. Esfericidade	14
2.2.8. Índice de firmeza	15
2.2.9. Calor específico	15
2.2.10. Cinzas	16
<b>2.3. Resfriamento de produtos hortícolas</b>	<b>17</b>
2.3.1. Resfriamento e armazenamento de manga	18
<b>2.4. Estudo matemático da transferência de calor no resfriamento</b>	<b>20</b>
2.4.1. Lei de Newton aplicada ao resfriamento	20
2.4.2. Lei de Fourier aplicada ao resfriamento	22

2.4.2.1. A Lei de Fourier em coordenadas cartesianas	23
2.4.2.2. A Lei de Fourier em coordenadas cilíndricas	24
2.4.2.3. A Lei de Fourier em coordenadas esféricas	26
<b>2.5. Parâmetros físicos relacionados à transferência de calor</b>	<b>27</b>
2.5.1. Condutividade térmica	27
2.5.2. Difusividade térmica	29
2.5.3. Taxa de resfriamento	30
2.5.4. Tempo de meio resfriamento	32
2.5.5. Fator de atraso	32
2.5.6. Coeficiente convectivo de transferência de calor	33
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>35</b>
<b>3.1. Matéria prima</b>	<b>35</b>
<b>3.2. Preparação da matéria prima</b>	<b>36</b>
<b>3.3. Caracterização física</b>	<b>37</b>
3.3.1. Dimensões	37
3.3.2. Massa	38
3.3.3. Volume	38
3.3.4. Massa específica	39
3.3.5. Conteúdo de água	39
3.3.6. Circularidade	40
3.3.7. Esfericidade	40
3.3.8. Índice de firmeza	41
3.3.9. Calor específico	41
3.3.10. Cinzas	42
<b>3.4. Resfriamento das frutas</b>	<b>44</b>
<b>3.5. Determinação dos parâmetros físicos de transferência de calor</b>	<b>49</b>
3.5.1. Taxa de resfriamento	49
3.5.2. Tempo de meio resfriamento	49
3.5.3. Fator de atraso	51
3.5.4. Difusividade térmica	51
3.5.5. Condutividade térmica	52
3.5.6. Coeficiente de transferência de calor	52
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>54</b>
<b>4.1. Medidas físicas</b>	<b>54</b>
4.1.1. Dimensões	54
4.1.2. Massa	55
4.1.3. Volume	55

4.1.4. Massa específica	55
4.1.5. Conteúdo de água	55
4.1.6. Circularidade	56
4.1.7. Esfericidade	56
4.1.8. Índice de firmeza	56
4.1.9. Calor específico	57
4.1.10. Cinzas	57
4.1.11. Resumo das características físicas	57
<b>4.2. Cinética de resfriamento da manga</b>	<b>59</b>
<b>4.3. Parâmetros físicos de transferência de calor no resfriamento</b>	<b>67</b>
4.3.1. Taxa de resfriamento	67
4.3.2. Tempos de resfriamento	68
4.3.2.1. Tempo de meio resfriamento	68
4.3.2.2. Tempo dos sete oitavos do resfriamento	69
4.3.2.3. Tempo de resfriamento da fruta até a temperatura de armazenamento	70
4.3.3. Difusividade térmica	71
4.3.4. Condutividade térmica	73
4.3.5. Fator de atraso	74
4.3.6. Raiz da Equação de Fourier	75
4.3.7. Número de Biot	75
4.3.8. Coeficiente convectivo de transferência de calor	76
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>78</b>
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	80
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>81</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>88</b>
<b>Anexo A</b>	<b>89</b>
<b>Anexo B</b>	<b>95</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Produção de manga no Brasil	7
Figura 2.2. Área plantada de manga no Brasil	7
Figura 2.3. Produtividade de manga no Brasil	8
Figura 3.1. Estádio de maturação dos frutos usados no experimento	35
Figura 3.2. Fluxograma de preparação dos frutos	36
Figura 3.3. Dimensões medidas nos frutos.	38
Figura 3.4. Câmara de refrigeração	44
Figura 3.5. Termopar no interior da fruta conectado ao registrador de temperatura	45
Figura 3.6. Fruta na câmara de refrigeração	45
Figura 3.7. Detalhe do termopar no interior do fruto	45
Figura 3.8. Estimção gráfica do tempo de meio resfriamento, $t_{1/2}$ , e dos sete oitavos do resfriamento, $t_{7/8}$	50
Figura 4.1. Curva de resfriamento da manga variedade Tommy Atkins resfriada a 6,0 °C	60
Figura 4.2. Curva de resfriamento da manga variedade Tommy Atkins resfriada a 8,0 °C	60
Figura 4.3. Curva de resfriamento da manga variedade Tommy Atkins resfriada a 10,0 °C	61
Figura 4.4. Curva de resfriamento da manga variedade Tommy Atkins resfriada a 12,0 °C	61
Figura 4.5. Curva de resfriamento da manga variedade Tommy Atkins resfriada a 14,0 °C	62
Figura 4.6. Curva de resfriamento da manga variedade Tommy Atkins resfriada a 16,0 °C	62
Figura 4.7. Curvas de resfriamento linearizadas nas seis temperaturas	64
Figura 4.8. Curvas experimentais médias de resfriamento para as temperaturas de 6,0 a 12,0 °C, com o produto resfriado até 12,0 °C.	70

---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Produção mundial de manga	6
Tabela 3.1. Temperaturas médias na câmara de refrigeração durante o resfriamento	46
Tabela 3.2. Umidade relativa média na câmara de refrigeração	47
Tabela 4.1. Dimensões médias da manga variedade Tommy Atkins	54
Tabela 4.2. Caracterização física da manga variedade Tommy Atkins	58
Tabela 4.3. Temperatura inicial média dos frutos nas seis temperaturas	59
Tabela 4.4. Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e desvio médio relativo ( $P$ )	63
Tabela 4.5. Taxa de resfriamento em função da temperatura	67
Tabela 4.6. Tempo de meio resfriamento em função da temperatura	68
Tabela 4.7. Tempo dos sete-oitavos do resfriamento em função da temperatura	69
Tabela 4.8. Tempos de resfriamento ( $z$ ) até 12,0°C em função da temperatura	71
Tabela 4.9. Difusividade térmica em função da temperatura	72
Tabela 4.10. Condutividade térmica em função da temperatura	73
Tabela 4.11. Fator de atraso em função da temperatura	74
Tabela 4.12. Raiz da Equação de Fourier em função da temperatura	75
Tabela 4.13. Número de Biot em função da temperatura	76
Tabela 4.14. Coeficiente convectivo de transferência de calor em função da temperatura	77
Tabela 1A. Dimensões da manga variedade Tommy Atkins	89
Tabela 2A. Massa da manga variedade Tommy Atkins	90
Tabela 3A. Volume da manga variedade Tommy Atkins	91
Tabela 4A. Massa específica da manga variedade Tommy Atkins	91
Tabela 5A. Conteúdo de água da manga variedade Tommy Atkins	92

Tabela 6A. Circularidade da manga variedade Tommy Atkins	92
Tabela 7A. Esfericidade da manga variedade Tommy Atkins	93
Tabela 8A. Índice de firmeza da manga variedade Tommy Atkins	93
Tabela 9A. Calor específico da manga variedade Tommy Atkins	94
Tabela 10A. Cinzas da manga variedade Tommy Atkins	94
Tabela 1B. Dados experimentais e calculados da temperatura e da razão de temperatura em função do tempo de resfriamento a 6,0 °C	95
Tabela 2B. Dados experimentais e calculados da temperatura e da razão de temperatura em função do tempo de resfriamento a 8,0 °C	98
Tabela 3B. Dados experimentais e calculados da temperatura e da razão de temperatura em função do tempo de resfriamento a 10,0 °C	100
Tabela 4B. Dados experimentais e calculados da temperatura e da razão de temperatura em função do tempo de resfriamento a 12,0 °C	102
Tabela 5B. Dados experimentais e calculados da temperatura e da razão de temperatura em função do tempo de resfriamento a 14,0 °C	104
Tabela 6B. Dados experimentais e calculados da temperatura e da razão de temperatura em função do tempo de resfriamento a 16,0 °C	106

## RESUMO

LEITE, José Cleidimário Araújo. **Cinética de resfriamento e caracterização física da manga (*Mangifera indica L.*) variedade Tommy Atkins**. Campina Grande, Paraíba: Universidade Federal de Campina Grande, 2005. 107p. Dissertação de Mestrado.

Neste trabalho estudou-se a cinética de resfriamento, as características físicas e os parâmetros físicos relacionados à transferência de calor no resfriamento da manga variedade Tommy Atkins. O resfriamento foi realizado em câmara de refrigeração convencional às temperaturas de 6,0 a 16,0 °C, em intervalos de 2,0 °C, e umidade relativa em torno de 73,0%. Na modelagem matemática utilizou-se a solução analítica da Equação de Fourier em coordenadas esféricas. As medidas físicas determinadas foram: dimensões, massa, volume, massa específica, conteúdo de água, circularidade, esfericidade, índice de firmeza, calor específico e cinzas. Na transferência de calor determinaram-se os parâmetros de condutividade e difusividade térmica, taxa de resfriamento, tempo de meio resfriamento, tempo dos sete-oitavos do resfriamento, fator de atraso e coeficiente convectivo de transferência de calor. De acordo com os resultados, os valores médios das medidas físicas estão próximos dos encontrados na literatura. A Equação de Fourier representa com precisão a cinética de resfriamento da manga nas temperaturas estudadas, principalmente para 12,0 e 14,0 °C. Os tempos de meio e dos sete-oitavos do resfriamento apresentam comportamento semelhante aos resultados citados na literatura. A condutividade e difusividade térmica não apresentam relação direta com a temperatura e o fator de atraso aumenta com a redução de temperatura na faixa estudada. Os valores do coeficiente convectivo de transferência de calor são bem maiores que os encontrados na literatura. A temperatura mais indicada para o resfriamento da manga variedade Tommy Atkins até 12,0 °C. é 6,0 °C.

**Palavras chave:** frutas tropicais, transferência de calor, refrigeração.

## SUMMARY

LEITE, José Cleidimário Araújo. **Cinética de resfriamento e caracterização física da manga (*Mangifera indica L.*) variedade Tommy Atkins**. Campina Grande, Paraíba: Universidade Federal de Campina Grande, 2005. 107p. Dissertação de Mestrado.

In this work was studied the cooling kinetic, physical characteristics and heat transfer physical parameters in the Tommy Atkins mango cooling. The cooling was made through in a conventional refrigeration chamber at temperatures from 6.0 to 16,0 °C, at each 2,0 °C, and relative humidity near 73,0%. In the mathematical modeling was used the analytical solution of the Fourier's Equation in spherical coordinates. The physical measures determined were: dimensions, mass, volume, specific mass, water content, roundness, sphericity, firmness index, specific heat and ashes. In the heat transfer were determined the following parameters: conductivity and thermal diffusivity, cooling rate, half cooling time and seven-eighths cooling time, lag factor and heat transfer convective coefficient. In agreement with the results, the average values of the physical measures are close of the one found in the literature. Fourier's Equation represents necessarily the cooling kinetic of the mango in the studied temperatures, mainly at 12.0 and 14.0 °C. The half cooling time and seven-eighths cooling time present similar behavior to the results mentioned in the literature. The conductivity and thermal diffusivity don't present direct relation with the temperature and the lag factor increases with the temperature reduction in the studied band. The values of the heat transfer convective coefficient are larger than those found in the literature. The most suitable temperature for the Tommy Atkins mango cooling up to 12,0 C. is 6,0 C.

**Key words:** tropical fruits, heat transfer, refrigeration.

# 1. INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se, em nível mundial, entre os países que apresentam uma das mais altas produções de frutas tropicais, devido principalmente as suas condições edafoclimáticas que favorecem diretamente o desenvolvimento e exploração de culturas frutíferas.

Dentre as frutas tropicais, a manga é a segunda mais produzida no mundo, superada apenas pela banana. Seu consumo ocorre, em grande parte, na forma *in natura*. Porém, existem produtos derivados como suco, doce, polpa, geléia, sorvete, vinagre, etc, em que sua elaboração, conservação e qualidade exigem um estudo de suas características físicas e químicas, bem como de seu comportamento em diferentes ambientes de armazenamento.

No Brasil, apenas uma pequena parte da produção é exportada, devido ao baixo uso de técnicas de conservação e às exigências de qualidade existentes no mercado internacional. Surge então a necessidade de se estudar técnicas de processamento e conservação desta fruta, que mantenham sua qualidade e proporcionem uma expansão do seu aproveitamento no mercado interno e externo.

Para elaboração de projetos de equipamentos relacionados ao aproveitamento sustentável de produtos agrícolas, torna-se indispensável o conhecimento das propriedades físicas desses produtos, sendo estas características consideradas fatores de relevância para as práticas de manejo e conservação da produção, tais como: transporte, armazenamento, secagem, resfriamento e outros. Entretanto, a determinação destas propriedades é fundamental para caracterizar e fazer uso adequado do produto, bem como para o dimensionamento de sistemas e equipamentos usados no seu armazenamento e processamento, como câmaras de refrigeração, secadores, despoldadoras, etc.

Com relação às características físicas, o estudo das propriedades termofísicas como a difusividade térmica, condutividade térmica, calor específico e outras, recebe destaque por estas estarem diretamente relacionadas aos processos que envolvem transferência de calor e, conseqüentemente, ao gasto de energia nos processos de resfriamento e armazenamento, que é um fator relevante para a viabilidade econômica de um projeto.

O conhecimento dos parâmetros físicos de transferência de calor envolvidos na secagem, resfriamento, no armazenamento e processamento de produtos hortícolas é necessário em diversas situações, como por exemplo, no cálculo da carga para o dimensionamento de equipamentos de refrigeração, na escolha da temperatura mais adequada para resfriar o produto e para o conhecimento do comportamento térmico deste durante processos em que a temperatura varia com o tempo.

A falta de um tratamento adequado no manejo dos produtos hortícolas após a colheita resulta em perdas da produção. Dentro deste quadro, as frutas são as que apresentam o maior índice de perdas, devido a sua sensibilidade às condições ambientes referentes à temperatura e umidade relativa, chegando, muitas vezes, a valores que se aproximam da metade do total produzido.

O aumento da produção de frutas e o surgimento de novos subprodutos derivados com melhor qualidade e durabilidade, vem exigindo soluções inovadoras que atendam às necessidades no armazenamento e processamento desses produtos, e que proporcionem a otimização dos sistemas de conservação.

Vários sistemas e técnicas têm sido utilizados no manejo da produção de frutas, sendo destaque os que usam baixas temperaturas, como câmaras frias convencionais com circulação de ar a baixas velocidades, câmaras frias e túneis de resfriamento em ar forçado, que são utilizados de acordo com o tipo do produto.

O resfriamento, que deve ser a primeira prática a ser realizada após a colheita e as operações de beneficiamento, consiste em submeter o produto a baixas temperaturas com a finalidade de reduzir, parcialmente, a sua atividade metabólica e, conseqüentemente, retardar o processo de amadurecimento e as atividades dos microorganismos responsáveis, muitas vezes, pela deterioração do produto, o que o torna impróprio para o aproveitamento industrial e também para o consumo direto.

A manga é uma das frutas tropicais que apresenta maior sensibilidade ao frio, sendo facilmente afetada, dependendo da variedade e do estágio de maturação, quando resfriada ou armazenada a baixas temperaturas. Contudo, se faz necessário o estudo do processo de transferência de calor que ocorre durante o resfriamento desta fruta, para diferentes temperaturas, proporcionando uma conservação de sua qualidade associada a um baixo custo de energia, possibilitando com isso uma maior exploração do seu potencial produtivo e econômico, e prolongando sua vida útil.

São poucos os dados disponíveis na literatura sobre produtos hortícolas produzidos no Brasil, principalmente para a manga que ainda é pouco explorada em

escala industrial. Diante deste contexto, se faz necessário o conhecimento de condições adequadas de aproveitamento desta fruta na pós-colheita que possibilitem o seu consumo na forma *in natura*, bem como o seu processamento para obtenção de subprodutos na indústria de alimentos.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Geral**

Estudar a cinética de resfriamento e as principais características físicas da manga variedade Tommy Atkins.

### **1.1.2. Específicos**

1. Determinar as dimensões, massa, volume, massa específica, conteúdo de água, circularidade, esfericidade, índice de firmeza, calor específico e cinzas;
2. Estudar a cinética de resfriamento da fruta às temperaturas de 6,0, 8,0, 10,0, 12,0, 14,0 e 16,0 °C;
3. Determinar os parâmetros físicos relacionados à transferência de calor no resfriamento, como condutividade e difusividade térmica, taxa de resfriamento, tempo de meio resfriamento, tempo dos sete-oitavos do resfriamento, fator de atraso e coeficiente convectivo de transferência de calor.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Manga

#### 2.1.1. Histórico

A mangueira teve origem na região Indo-Bruna-Malaya do sudoeste da Ásia e Malásia, de onde a cultura passou a ser distribuída para as outras partes do mundo (CASTRO NETO, 1995).

A cultura foi difundida para outras regiões por meio das viagens, descobrimentos e colonizações européias. A distribuição do germoplasma pode ter ocorrido por meio do fruto “de vez” ou de mudas trazidas pelos descobridores. Alguns relatos indicam que a introdução da cultura no Brasil foi realizada pelos portugueses logo após o descobrimento (CASTRO NETO & CUNHA, 2000).

#### 2.1.2. Aspectos agronômicos

A mangueira pertence à espécie *Mangifera indica* da família *Anacardeaceae*, que apesar de possuir muitas outras espécies comestíveis, a *Mangifera indica* é a única cultivada comercialmente em larga escala. A planta tem porte médio a grande, copa arredondada e folhas verdes lanceoladas, medindo de 15,0 a 40,0 cm de comprimento, com coloração que vai desde o verde claro a uma tonalidade levemente amarronzada ou arroxeada, quando jovens, e verde normal a escuro, quando maduras. O fruto é uma drupa bastante variável em termos de tamanho, peso, forma e cor. A casca é coriácea e macia, envolve a polpa, de cor amarela com várias tonalidades, mais ou menos fibrosa, de acordo com a variedade, e de sabor variado. A semente é fibrosa e apresenta formas similares, mas com tamanhos diferentes na variedade (CASTRO NETO & CUNHA, 2000).

A planta possui características altamente heterozigotas e por muitos anos foi propagada via semente, originando milhares de variedades. Essas variedades podem ser agrupadas em dois tipos: Indianas e Indochinesas. As Indianas são predominantemente monoembriônicas, de frutos coloridos susceptíveis à antracnose e deram origem às

variedades da Flórida. As Indochinesas são poliembriônicas, de frutos pálidos ou esverdeados sem laivos avermelhados e relativamente resistentes à antracnose (NUNES, 1995).

As áreas com estações secas e chuvosas bem definidas são as mais indicadas para o cultivo da cultura. O período de estiagem deve ocorrer antes do florescimento e até a frutificação, sendo ideal a presença da chuva após a frutificação para estimular o desenvolvimento dos frutos. O regime pluviométrico pode variar entre 500,0 e 2500,0 mm por ano, com as condições anteriores sendo atendidas. A planta vegeta e produz na faixa de temperatura entre 0 e 48,0 °C, em que a temperatura ótima está entre 24,0 e 26,0 °C (CUNHA, 2000).

Apesar de ser considerada uma planta rústica, os pomares devem ser localizados em áreas com solos profundos, permeáveis, bem drenados e com profundidade do lençol freático maior que 2,0 m (NASCIMENTO et al., 2000).

A frutificação inicia-se três anos após o plantio, quando a planta é enxertada e conduzida de acordo com os requisitos técnicos exigidos pela cultura, sendo que sua produção econômica inicia-se no quarto ano. Os frutos devem ser colhidos “de vez”, que é quando atingem o seu completo desenvolvimento, para chegar ao mercado consumidor em bom estado de maturação e conservação. O ponto de maturação ideal para a colheita dependerá do tempo necessário para os frutos serem consumidos ou industrializados, devendo ser colhidos completamente maduros, quando destinados ao consumo imediato, e “de vez”, quando forem transportados ou armazenados por longos períodos (CUNHA & SAMPAIO, 2000).

A colheita da manga deve ser feita essencialmente no estágio de maturação correto para facilitar o transporte, amadurecimento normal e proporcionar o aumento no período de armazenamento. Se os frutos são colhidos em estágio muito desenvolvido, ou totalmente maduros, tornam-se muito sensíveis a danos mecânicos e incidência de doenças, fatores que causam redução no tempo de armazenamento. Quando colhidos imaturos e armazenados perdem a qualidade e ficam muito sensíveis à perda de água e a desordens fisiológicas (ROCHA et al., 2001).

### 2.1.3. Produção no Brasil e no mundo

Na Tabela 2.1 encontram-se apresentados os valores da produção mundial de manga para os dez países mais produtores no período de 2000 a 2004, de acordo com dados da FAO (2005). A ordem de classificação obedece a posição dos países nos dois últimos anos.

**Tabela 2.1.** Produção mundial de manga.

Países	Produção (toneladas)				
	Anos				
	2000	2001	2002	2003	2004
Índia	10.500.000	10.060.000	10.640.000	10.780.000	10.800.000
China	3.210.692	3.272.875	3.513.366	3.420.513	3.622.000
Tailândia	1.633.479	1.700.000	1.750.000	1.750.000	1.750.000
México	1.559.351	1.577.450	1.523.160	1.503.010	1.503.010
Paquistão	989.790	1.037.145	1.035.000	1.072.000	1.072.000
Filipinas	848.328	881.700	955.900	890.000	890.000
Brasil	538.301	782.308	842.349	845.000	845.000
Indonésia	876.027	923.294	1.402.910	731.240	800.000
Nigéria	730.000	730.000	730.000	730.000	730.000
Egito	298.880	325.467	326.063	327.000	327.000

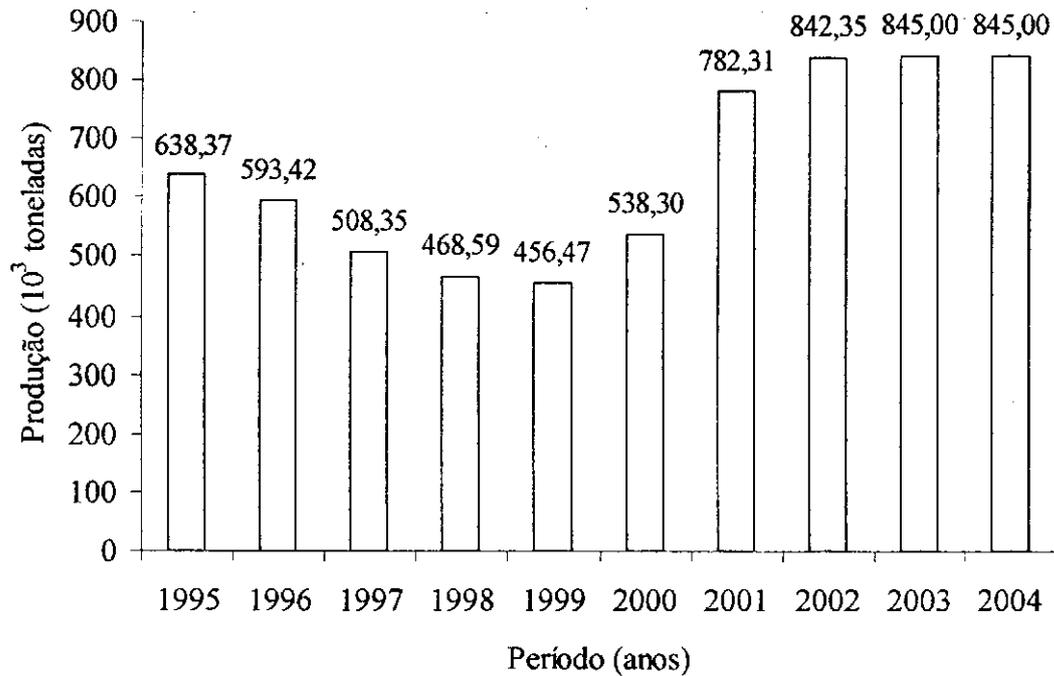
Fonte: FAO (2005).

Observa-se na Tabela 2.1 que a produção mundial nos últimos cinco anos é liderada pela Índia, seguida da China e Tailândia. A maioria dos países apresenta um aumento na produção ao longo dos anos, com exceção do México e da Indonésia, que tiveram uma redução na produção neste período.

O Brasil ocupa a sétima colocação na produção mundial, apresentando um aumento significativo de sua produção, passando de 538.301 toneladas em 2000 para 845.000 toneladas em 2003, mantendo-se constante em 2004.

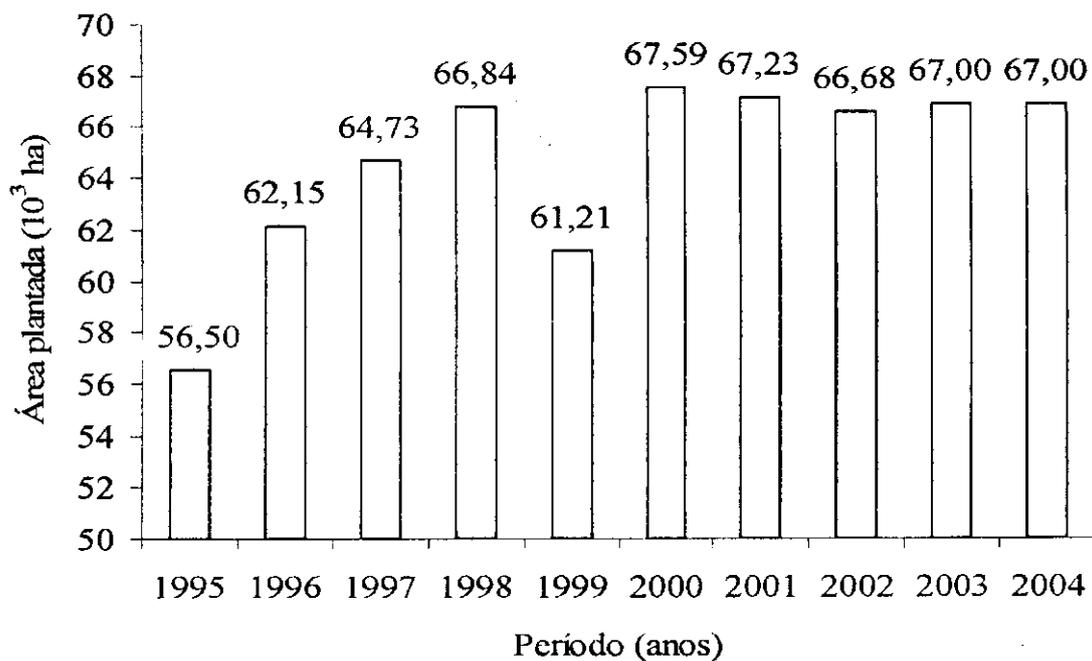
Esse crescimento pode ser melhor observado na Figura 2.1, em que se tem a produção de manga no Brasil nos últimos dez anos, segundo dados da FAO (2005).

Na Figura 2.2 é apresentado um histórico da área plantada no Brasil, nesse mesmo período (FAO, 2005).



**Figura 2.1.** Produção de manga no Brasil.

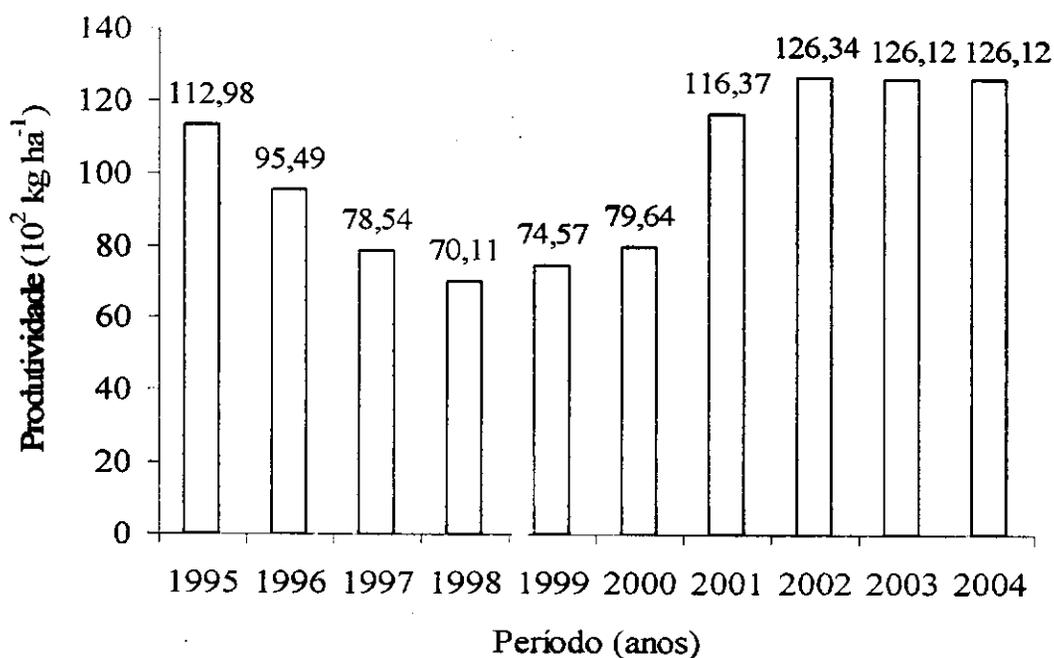
De acordo com a Figura 2.1, houve um declínio da produção a partir de 1995 até 1999, ocorrendo um aumento significativo desta no ano 2000 e permanecendo constante nos últimos três anos, com um total de 845.000 toneladas.



**Figura 2.2.** Área plantada de manga no Brasil.

Observando a Figura 2.2, nota-se um aumento da área produzida a partir de 1995, com uma redução em 1999, e retomada do crescimento em 2000, chegando próximo de 68.000 ha, continuando estável nos últimos cinco anos.

Na Figura 2.3 apresenta-se a produtividade de manga no Brasil nos últimos dez anos (FAO, 2005).



**Figura 2.3.** Produtividade de manga no Brasil.

De acordo com a Figura 2.3, a produtividade nacional da fruta teve um decréscimo acentuado de 1995 a 1998, iniciando o período de crescimento em 1999, chegando a um valor próximo a 12.700 kg ha<sup>-1</sup> nos três últimos anos.

Os dados referentes à produção, área plantada e produtividade da cultura da manga no Brasil indicam um alto crescimento na exploração e na produção da cultura no país, indicando ainda perspectivas de continuação desta tendência nos próximos anos.

A partir destes dados é possível verificar que a cultura da manga apresenta-se como uma das mais exploradas no Brasil, destacando-se, em termos de produção, entre os países que são os maiores produtores no mundo.

#### **2.1.4. Importância econômica**

Devido ao seu excelente sabor, aroma e coloração característicos, a manga é considerada uma importante fruta tropical, sendo que sua industrialização se torna viável, principalmente por causa da sazonalidade da cultura, com objetivo de reduzir as perdas na produção e proporcionar um melhor aproveitamento da fruta (BRUNINI et al., 2002).

A manga é uma das frutas tropicais brasileiras que alcança melhor preço no mercado internacional, por se possível produzi-la no período de baixa oferta. Mas essa situação pode ser mudada, já que outros países estão buscando ampliar seus períodos de produção (MORAIS et al., 2002).

No Brasil, a produção de manga tem um grande potencial de crescimento para exportação, tendo apresentado competitividade tanto em relação aos aspectos referentes aos preços, principalmente depois da desvalorização cambial de 1999, como em termos de qualidade (PEDROSA & PIERRE, 2002).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Frutas (2003) citado em PFAFFENBACH et al. (2003), as exportações de manga em 2002 chegaram ao montante de US\$ 50 milhões, o equivalente a 103,0 mil toneladas, colocando a fruta em primeiro lugar em valor econômico e em segundo lugar em peso, entre as exportadas.

Segundo PEDROSA & PIERRE (2002), a América do Norte, Europa, os países do Extremo Oriente e Oriente Médio destacam-se com maiores taxas de crescimento na demanda pela manga. Por não apresentar exigências como os Estados Unidos e o Japão, o mercado europeu é mais acessível e também o mais disputado.

#### **2.1.5. A variedade Tommy Atkins**

A manga variedade Tommy Atkins teve origem na Flórida, EUA, e foi introduzida em São Paulo na década de 70, através do Instituto Agrônomo de Campinas (DIAS et al., 2003).

A planta desta variedade produz frutos médios e grandes que chegam a 13,0 cm de comprimento e massa entre 400,0 e 600,0 g, que resistem ao manuseio e transporte, possui casca grossa, lisa e de coloração que vai do vermelho com laivos amarelos ao vermelho brilhante. A polpa apresenta textura firme, coloração amarela escura, sabor agradável, doce e com poucas fibras. A semente corresponde a cerca de 8,0 % da massa

do fruto. A árvore é vigorosa de copa densa e arredondada. Sua produção é de meia-estação, de outubro a janeiro, apresentando resistência mediana à antracnose e uma das mais sensíveis ao colapso interno (PINTO et al., 2000).

De acordo com NUNES (1995) esta variedade apresenta frutos grandes, com massa entre 300,0 e 700,0 g, chegando a 15,0 cm de comprimento, formato ovulado a oblongo, cor laranja-amarelada, laivos de cor avermelhada, brilhantes, superfície lisa, casca grossa e resistente ao armazenamento e ao transporte. A polpa é amarela escura, textura firme, pela presença de fibras finas, sujeita ao amolecimento interno de origem fisiológica e com bom sabor. A semente é pequena e corresponde de 6,0 a 8,0 % da massa do fruto, é monoembriônica e precoce a meia estação. A planta é vigorosa com densa folhagem e esta variedade é indicada para consumo *in natura* e para o mercado industrial.

## **2.2. Características físicas**

Os produtos derivados da manga que são processados e apresentados comercialmente na forma de suco, sorvete, néctar, sobremesas e outros, são de grande importância, além da fruta na forma *in natura*. Entretanto, para a fabricação desses produtos, são utilizados processos nos quais é indispensável o conhecimento das propriedades físicas e químicas da fruta (VIDAL & GASPARETTO, 2000).

### **2.2.1. Dimensões**

As dimensões são propriedades significantes na caracterização do produto. No entanto, às vezes é necessário fazer algumas aproximações ou considerações nos cálculos envolvendo produtos vegetais por estes não apresentarem formas bem definidas.

A seleção e classificação da manga baseiam-se, principalmente, nas características de qualidade, que estão associadas ao estágio de maturação, cor, condições de fitossanidade e de limpeza e danos mecânicos que a fruta apresenta, sendo consideradas também as características físicas como dimensões, massa e forma (BLEINROTH, 1994).

### 2.2.2. Massa

A massa é uma característica física essencial na seleção e comercialização de produtos hortícolas, sendo um dos critérios usados na exportação do produto, especialmente para a manga.

Segundo BLEINROTH (1994) a massa é uma das características físicas consideradas na seleção e classificação da manga.

As normas internacionais de qualidade para exportação de manga estabelecem que a fruta para o consumo *in natura* deve apresentar no mínimo 200,0 g de massa (FILGUEIRAS et al. 2000b).

### 2.2.3. Volume

Vários métodos são utilizados para determinação do volume de produtos agrícolas. MOHSENIN (1978) apresenta alguns desses métodos: balança de peso específico, tubo gradiente de peso específico, picnômetro de comparação a ar e balança de plataforma.

O método da balança de plataforma é relativamente simples e é aplicado na determinação do volume de produtos como frutas e hortaliças. Este método consiste na pesagem do volume de água deslocado pela imersão total do produto no meio líquido, em que o volume do produto é obtido por meio da relação entre a massa de água correspondente ao volume deslocado e a massa específica da água (QUEIROZ, 1994).

Diversos pesquisadores utilizaram o método da balança de plataforma na determinação do volume de produtos agrícolas, principalmente de frutas (ALMEIDA, 1999; QUEIROZ, 1994; SILVA, 2002).

TERUEL et al. (2004) estudaram a relação do volume de diversas frutas e hortaliças com o tempo de resfriamento e verificaram que este parâmetro variou proporcionalmente com o volume dos frutos.

### 2.2.4. Massa específica

A massa específica é definida como a relação entre a massa de uma dada amostra e o seu volume (IBARZ & BARBOSA-CÁNOVAS, 1999).

MOHSENIN (1980) apresenta três métodos de determinação da massa específica de materiais biológicos:

1. Massa específica volumétrica: relação entre a massa de unidades individuais intactas do material, em um determinado volume, incluindo o espaço poroso da massa de material;
2. Massa específica aparente: refere-se à massa de cada unidade intacta do material dividida pelo seu volume, incluindo o espaço poroso dentro de cada unidade;
3. Massa específica real: relação entre a massa e a unidade de volume dos sólidos dentro de cada unidade do material.

TELIS-ROMERO et al. (1998), determinaram a massa específica do suco de laranja para diferentes temperaturas e concentrações utilizando um picnômetro de 25,0 ml previamente calibrado com água destilada e verificaram uma dependência linear da massa específica com a temperatura e com o conteúdo de água, tendo esta aumentado com a redução do conteúdo de água para a mesma temperatura e com a redução da temperatura para um conteúdo de água constante.

A massa específica é um parâmetro que pode ser usado na determinação do ponto de colheita da manga, que deve ser colhida com uma massa específica entre 1,01 e 1,02 g cm<sup>-3</sup> (BLEINROTH, 1994).

ARAÚJO (2000) encontrou um valor para a massa específica de 0,945 g cm<sup>-3</sup> de frutos de acerola, ao estudar as alterações físico-químicas deste fruto submetido a três diferentes técnicas de congelamento.

ALMEIDA (1999) obteve valores médios de massa específica de 1,063 g cm<sup>3</sup> e 1,066 g cm<sup>3</sup> para o umbu semi-maduro e maduro, durante o armazenamento em três temperaturas distintas, observando que houve uma variação deste parâmetro durante o período de armazenamento.

### **2.2.5. Conteúdo de água**

O conteúdo de água de um produto pode ser definido como a relação entre a massa de água livre contida neste e sua massa total. A água influencia diretamente as características necessárias aos processos como colheita, armazenamento, embalagem,

entre outros, visto que esses processos exigem uma determinada quantidade de água para que não haja perdas do produto.

Existem dois métodos para expressar o conteúdo de água de um material: base úmida e base seca.

O conteúdo de água base úmida pode ser determinado por meio da Equação 2.1.

$$X_{wu} = \frac{m_a}{m_t} \times 100 \quad (2.1)$$

em que:

$X_{wu}$  - conteúdo de água base úmida, %;

$m_a$  - massa de água da amostra, g;

$m_t$  - massa total da amostra, g.

O conteúdo de água base seca é calculado de acordo com a Equação 2.2.

$$X_{ws} = \frac{m_a}{m_s} \times 100 \quad (2.2)$$

em que:

$X_{ws}$  - conteúdo de água base seca, %;

$m_a$  - massa de água da amostra, g;

$m_s$  - massa seca da amostra, g.

GUIMARÃES (2000) estudou o comportamento da polpa de manga armazenada em períodos de 45, 90, 135 e 180 dias e obteve um conteúdo de água de 80,47, 82,11, 80,87 e 82,01%, respectivamente. SIMÕES (1997) obteve um conteúdo de água de 87,03% para a polpa de manga integral, variedade Tommy Atkins.

TELIS-ROMERO et al. (1998), verificaram uma dependência linear das propriedades termofísicas do suco de laranja com a temperatura e com o conteúdo de água, que apresentou uma grande influência nas propriedades estudadas.

O conteúdo de água está relacionado ao calor específico dos materiais biológicos e o conhecimento desta influência contribui extensivamente para a análise de processos térmicos (WANG & BRENNAN, 1993).

### 2.2.6. Circularidade

De acordo com CAVALCANTI MATA & FERNANDES FILHO (1984) a circularidade é um fator que indica o quanto a área de um objeto aproxima-se de um círculo. Este autor apresenta a seguinte equação para determinação desta medida:

$$\varphi = \frac{\sum r_i}{NR} \times 100, \quad (2.3)$$

em que:

$\varphi$  - circularidade, %;

$r_i$  - raio de cada círculo inscrito internamente nos ângulos de projeção do objeto, cm;

$R$  - raio do maior círculo possível de ser inscrito na projeção, cm;

$N$  - número total de ângulos internos da projeção.

QUEIROZ (1984) obteve um valor para a circularidade do umbu de  $86,7 \pm 6\%$ . SILVA (2002) encontrou um valor médio para este parâmetro igual a 69,53% em frutos de cajá.

### 2.2.7. Esfericidade

A esfericidade é baseada na característica isoperimétrica de uma esfera e estima o grau de esfericidade de um objeto (MOHSENIN, 1978).

ALMEIDA (1999) determinou a esfericidade do umbu nos estádios de maturação semi-maduro e maduro, obtendo os valores médios de 88,74 e 87,36%, respectivamente. Este autor observou uma variação desta propriedade durante o armazenamento refrigerado do fruto em ambos os estádios de maturação.

### 2.2.8. Índice de firmeza

A firmeza é definida como um conjunto de propriedades do produto, composto por características físicas perceptíveis pelo tato e que se relacionam com a deformação, desintegração e escoamento do produto, sob a aplicação de uma força (CHITARRA e CHITARRA, 1990).

O grau de maturação da manga pode ser determinado por meio do índice de firmeza da polpa, em que se verifica a resistência da fruta com um penetrômetro. A colheita da fruta deve ser iniciada quando esta apresentar uma firmeza da ordem de 12,0 kg cm<sup>-2</sup>, ou variando de 11,0 a 13,0 kg cm<sup>-2</sup> (BLEINROTH, 1994).

MEDEIROS (2003) utilizou um penetrômetro para determinar a resistência de frutos da goiabeira com casca e da polpa, e calculou o índice de firmeza por meio da Equação 2.4.

$$F_p = \frac{M g}{A} \quad (2.4)$$

em que:

$F_p$  - índice de firmeza, N m<sup>-2</sup>;

$M$  - resistência, kg;

$g$  - aceleração da gravidade, m s<sup>-2</sup>;

$A$  - área da seção transversal do penetrômetro, m<sup>2</sup>.

A resistência do fruto umbu nos estádios de maturação semi-maduro e maduro durante um período de armazenagem refrigerada diminuiu com o tempo de armazenagem (ALMEIDA, 1999). Frutos de goiaba também apresentaram diminuição da resistência durante o armazenamento (MEDEIROS, 2003).

### 2.2.9. Calor específico

O calor específico é a energia necessária para elevar em 1,0 °C a temperatura de uma unidade de massa (IBARZ & BARBOSA-CÁNOVAS, 1999). Quanto menor o calor específico de uma substância, mais facilmente ela pode sofrer variações em sua

temperatura. É importante salientar que o calor específico depende da substância e não da quantidade total da massa.

Segundo SIMÕES (1997) vários métodos utilizados na determinação do calor específico baseiam-se no equilíbrio térmico que é estabelecido entre um corpo em que se pretende determinar o calor específico e outro de calor específico conhecido.

MOHSENIN (1980) apresenta alguns métodos para a determinação experimental do calor específico de produtos agrícolas, entre eles o método das misturas em que uma amostra com temperatura e massa conhecida é colocada em um calorímetro com calor específico conhecido e com determinada quantidade de água com temperatura e massa também conhecida.

Na literatura encontram-se diversos trabalhos em que os autores estudaram a relação do calor específico com a temperatura e com o conteúdo de água em diferentes produtos agrícolas.

WANG & BRENNAN (1993) avaliaram a influência do conteúdo de água e da temperatura no calor específico de batata pelo método do calorímetro diferencial de varredura e verificaram que o calor específico varia linearmente com a temperatura e de forma quadrática com o conteúdo de água.

TELIS-ROMERO et al. (1998) determinaram o calor específico do suco de laranja em função da temperatura e do conteúdo de água, constatando que este aumentou com o aumento do conteúdo de água à temperatura constante e que a temperatura foi responsável pelos valores mais elevados do calor específico.

#### 2.2.10. Cinzas

As cinzas consistem no resíduo obtido por aquecimento de um produto em temperatura próxima a 600,0 °C. Nem sempre este resíduo representa toda a substância inorgânica presente na amostra, pois alguns sais podem sofrer redução ou volatilização nesse aquecimento. Geralmente, as cinzas são obtidas por ignição de quantidade conhecida da amostra, entre 1,0 e 5,0 g, em cadinho ou cápsula de platina, porcelana ou outro material resistente ao calor, e mantido em mufla a 550,0 °C, até eliminação completa do carvão (IAL, 1976).

Segundo GUIMARÃES (2000), as cinzas em alimentos referem-se ao resíduo orgânico resultante da queima da matéria orgânica, sem resíduo de carvão. Para o autor, a composição das cinzas não corresponde à quantidade de substâncias minerais

presentes nos alimentos, em virtude das perdas por volatilização ou mesmo pela reação entre componentes. Afirma ainda que as cinzas são consideradas como medida geral de qualidade e é utilizada com frequência como critério para identificação de alimentos.

SIMÕES (1997) determinou as cinzas para a polpa de manga integral obtendo um valor igual a 0,276%.

Estudando o comportamento da polpa de manga armazenada nos períodos de 45, 90, 135 e 180 dias, GUIMARÃES (2000) obteve valores das cinzas de 0,43, 0,42, 0,45 e 0,39%, respectivamente.

### 2.3. Resfriamento de produtos hortícolas

Para prolongar a vida útil dos produtos após a colheita, estes são resfriados de condições de temperatura ambiente para a temperatura de armazenamento (ALVAREZ & TRYSTRAM, 1995).

Estima-se que o valor das perdas anuais de produtos frescos, incluindo as frutas, por amadurecimento precoce e por falta de tratamento adequado após a colheita, pode chegar até 50%, dependendo do produto (TERUEL et al., 2003).

A predição exata da distribuição de temperatura em produtos hortícolas, a duração do processo e o consumo de energia durante o resfriamento são parâmetros de extrema importância nos projetos de sistemas de refrigeração, para estimar o custo efetivo de operação e para garantir a segurança e qualidade apropriada do produto (FIKIIN, 1996).

Para SIMÕES (1997) os alimentos devem ser processados, resfriados ou congelados, quando não são consumidos diretamente, para que suas características sejam mantidas e para que não ocorra o desenvolvimento de microorganismos.

O resfriamento tem um importante efeito na pós-colheita de frutas em reduzir as atividades fisiológicas, os danos físicos nos tecidos, a perda de água e a contaminação por microorganismos (MARTÍNEZ-ROMERO et al., 2003).

Segundo FERREIRA et al. (2000), o resfriamento remove de forma rápida o calor do campo após a colheita, antes do transporte, armazenamento e processamento do produto, evitando desperdícios e reduzindo as perdas que podem ocorrer durante a comercialização deste na forma *in natura*.

Para maximizar a eficiência das operações de resfriamento, é necessário projetar o equipamento de refrigeração para se ajustar às exigências específicas da aplicação (BECKER & FRICKE, 2004).

A eficiência do resfriamento é caracterizada pela relação entre o tempo e a temperatura sendo que, quanto menor o tempo de resfriamento, maior será a eficiência do sistema, o que mantém a qualidade do produto e aumenta sua vida útil de prateleira (TERUEL et al., 2003; BRACKMANN et al., 2001).

Por outro lado, um controle estratégico da temperatura, umidade e velocidade do ar no resfriamento permite a redução do tempo de resfriamento e conseqüentemente, a redução do consumo de energia (ALVAREZ & TRYSTRAM, 1995).

O tempo de resfriamento está diretamente relacionado com a temperatura do meio, como discutido em diversos trabalhos na literatura:

ARAÚJO (2000) estudaram as alterações físico-químicas de acerola quando submetida a três diferentes técnicas (congelamento em freezer, por circulação de nitrogênio e por imersão em nitrogênio líquido) e três diferentes temperaturas de congelamento (- 22,6, - 100,0 e - 196,0 °C) obtendo tempos de resfriamento de 30,0, 6,0 e 1,0 min, para cada nível de temperatura.

FERREIRA (2000) avaliou o efeito do congelamento sobre as características físico-químicas da polpa de umbu utilizando três técnicas de congelamento (congelamento em freezer, por circulação de nitrogênio e por imersão em nitrogênio líquido) às temperaturas de - 22,6, - 110,0 e - 196,0 °C, encontrando os tempos de resfriamento de 20,0, 14,0 e 1,17 min, respectivamente.

TERUEL et al. (2002) estudaram o resfriamento de banana num sistema com ar forçado em função do fluxo de ar e da área de abertura da embalagem, verificando uma dependência acentuada do tempo de resfriamento em relação à taxa de fluxo de ar e ao tipo de embalagem.

### **2.3.1. Resfriamento e armazenamento de manga**

A deterioração fisiológica da manga é resultante do excessivo amadurecimento e do desenvolvimento de patógenos que danificam a qualidade da fruta. Estes fatores limitam a vida útil dos frutos (PFAFFENBACH et al., 2003).

No entanto, o resfriamento e o armazenamento refrigerado da manga são estritamente necessários para garantir a qualidade desta por períodos prolongados, e conseqüentemente manter o preço de mercado na comercialização *in natura*.

De acordo com BLEINROTH (1994), nos inúmeros trabalhos realizados para estudar a conservação da manga demonstra-se que a temperatura adequada a essa operação depende da cultivar que se deseja armazenar, bem como do seu grau de maturação e do tempo durante o qual se pretende conservar a fruta.

A manga é uma fruta muito sensível ao frio e esta sensibilidade está relacionada à variedade e, em geral, ao estágio de maturação, sendo maior nos frutos mais verdes (FILGUEIRAS et al., 2000a).

Devido a sua sensibilidade ao frio, seu resfriamento deve ser feito de forma lenta. Essa operação pode ser realizada em câmara convencional de refrigeração, fazendo com que, após um tempo de 10,0 a 14,0 h, a temperatura no interior da fruta atinja 10,0 °C. Abaixo de 10,0 °C podem ocorrer danos pelo frio, que é mais acentuado quando a fruta está totalmente verde. Quando apresenta coloração amarela, sua sensibilidade ao frio é menor, podendo suportar temperaturas de até 9,0 °C no armazenamento (BLEINROTH, 1994).

CHOUDHURY (1995) afirma que a temperatura adequada para a conservação da manga depende da cultivar, estágio de maturação, composição química e do tempo que se pretende conservar a fruta.

A temperatura recomendada para o armazenamento ou transporte da manga está na faixa de 10,0 a 13,0 °C (FILGUEIRAS et al., 2000b; ASHRAE, 1994).

ALVES et al. (1998) recomendam a conservação da manga variedade Tommy Atkins à temperatura de 12,0 °C.

Quando produzidas e colhidas no estágio de maturação adequado, armazenadas na faixa de temperatura entre 10,0 e 12,0 °C e umidade relativa de 90%, as frutas podem ser conservadas durante 30 dias (CHOUDHURY, 1995).

Segundo FILGUEIRAS et al. (2000a) a manga pode ser conservada a 10,0 °C e umidade relativa de 90,0% por um período de pelo menos três semanas, quando a variedade não for muito sensível ao frio.

PFAFFENBACH et al. (2003) estudaram as características de qualidade e conservação de mangas variedade espada vermelha armazenadas a 12,0 °C e 90,0% de

umidade relativa, em diferentes embalagens, observando uma redução de massa dos frutos ao longo do período de armazenamento.

## 2.4. Estudo matemático da transferência de calor no resfriamento

MOHSENIN (1980) apresenta duas leis para o estudo do resfriamento de um determinado material: a Lei de Newton e a Lei de Fourier.

### 2.4.1. Lei de Newton aplicada ao resfriamento

De acordo com esta Lei, quando um material está sendo resfriado de uma temperatura inicial  $T_i$ , a resistência ao fluxo de calor pode ser considerada admitindo apenas a resistência na superfície do material e as seguintes considerações (MOHSENIN, 1980):

- condutividade térmica,  $k$ , alta quando comparada com a condutância por unidade de superfície ou coeficiente convectivo de transferência de calor,  $h$ , sendo que o número de Biot é inferior a 0,2;
- gradiente de temperatura no interior do material sólido é considerado desprezível;
- temperatura da superfície, em nenhum instante, é consideravelmente diferente de sua temperatura média interna (inexistência de um gradiente de temperatura).

Considerando as três condições citadas, o fluxo de calor pode ser calculado pela Lei de Newton, de acordo com a Equação 2.5.

$$\frac{dQ}{dt} = -hA(T - T_f) \quad (2.5)$$

em que:

$\frac{dQ}{dt}$  - taxa de transferência de calor,  $J s^{-1}$ ;

$h$  - coeficiente convectivo de transferência de calor,  $W m^{-2} °C^{-1}$ ;

$A$  - área superficial do sólido,  $m^2$ ;

$T$  - temperatura após um tempo determinado  $t$ , °C;

$T_f$  - temperatura média do meio de resfriamento, °C.

Sabendo que:

$$Q = c_p \rho V \Delta T \quad (2.6)$$

Derivando a Equação 2.6, tem-se:

$$dQ = c_p \rho V dT \quad (2.7)$$

Substituindo a Equação 2.7 em 2.5, tem-se:

$$c_p \rho V \frac{dT}{dt} = -hA(T - T_f), \quad (2.8)$$

em que:

$c_p$  - calor específico do material, J kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>;

$\rho$  - massa específica do material, kg m<sup>-3</sup>;

$V$  - volume do material, m<sup>3</sup>;

$dT/dt$  - taxa de variação da temperatura.

Admitindo que as propriedades térmicas não se alteram com a temperatura e que a temperatura do meio permanece constante e igual a temperatura ambiente de resfriamento, ou seja  $T_f = T_a$ , a Equação 2.8 pode ser integrada do tempo zero ao tempo  $t$ , sendo o tempo zero o momento em que o material é colocado em contato com o meio de resfriamento e o tempo  $t$ , um instante qualquer após o início do processo, e da temperatura inicial do material,  $T_i$ , a sua temperatura em um instante de tempo  $t$ ,  $T$ . Logo, a Equação 2.8 é escrita como segue:

$$\int_{T_i}^T \frac{dT}{(T - T_a)} = -\frac{hA}{c_p \rho V} \int_0^t dt \quad (2.9)$$

A solução desta equação diferencial é dada por:

$$\ln \frac{(T - T_a)}{(T_i - T_a)} = \left[ -\frac{hA}{c_p \rho V} \right] t \quad (2.10)$$

Linearizando a Equação 2.10, tem-se:

$$\frac{(T - T_a)}{(T_i - T_a)} = \exp \left[ \left( -\frac{hA}{c_p \rho V} \right) t \right] \quad (2.11)$$

Esta equação expõe que no resfriamento a temperatura do material diminui exponencialmente com o tempo. Verifica-se ainda nesta equação que o intervalo de tempo requerido para o material ter uma variação de temperatura é diretamente proporcional a sua resistência térmica na superfície,  $1/hA$ , a seu calor específico,  $c_p$ , massa específica,  $\rho$ , e a relação entre o volume e a área superficial,  $V/A$ . A equação também indica que levará um tempo infinito para se atingir a condição de estado estacionário em equilíbrio térmico com o ambiente quando  $T$  aproxima-se de  $T_a$ . Na prática, para uma alta condutividade, como assumido inicialmente, a diferença entre  $T$  e  $T_a$  será extremamente pequena após um intervalo de tempo pequeno (MOHSENIN, 1980).

#### 2.4.2. Lei de Fourier aplicada ao resfriamento

De forma geral, no resfriamento de alimentos e produtos agrícolas, a condutância por unidade de superfície,  $h$ , é alta em relação à condutividade térmica,  $k$ , de modo que a variação de temperatura na superfície é muito mais rápida que no interior do produto, existindo um apreciável gradiente de temperatura. Neste caso, outras condições, opostas às consideradas na Lei de Newton para o resfriamento, são apresentadas (MOHSENIN, 1980):

- condutância por unidade de superfície,  $h$ , é alta em relação à condutividade térmica do material sólido,  $k$ , com  $Bi > 0,2$ ;
- gradiente de temperatura  $dT/dx$  não é pequeno e varia com o tempo;

- temperatura média no interior do sólido é diferente da temperatura na sua superfície (existência de um gradiente de temperatura).

A Lei de Fourier aplicada ao resfriamento pode ser resolvida em coordenadas cartesianas, cilíndricas e esféricas, como apresentado a seguir.

#### 2.4.2.1. A Lei de Fourier em coordenadas cartesianas

A taxa de condução de calor em um elemento de espaço infinitesimal adicionada à taxa de geração de calor interna é igual a taxa de aumento de energia interna. Em um material isotrópico, em que uma fonte de calor interna está presente e a condutividade térmica é variável, a condução de calor é expressa por meio da Equação de Fourier em coordenadas cartesianas  $x$ ,  $y$  e  $z$  (Equação 2.12), de acordo com Rohsenow, citado por MOHSENIN (1980):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_i = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.12)$$

sendo  $q_i$  a taxa interna de geração de calor,  $\text{J h}^{-1} \text{m}^{-3}$ .

Considerando que a condutividade térmica,  $k$ , é uniforme e constante, a Equação 2.12 pode ser escrita como:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_i}{k} = \frac{\rho c_p}{k} \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (2.13)$$

Para um material sem fonte interna de calor, ou seja,  $q_i$  igual a zero, a equação em coordenadas retangulares é reduzida para:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right], \quad (2.14)$$

em que  $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$  é a difusividade térmica, em  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ .

No caso de uma lâmina infinita de espessura uniforme  $2x_m$ , a temperatura varia apenas em uma direção e a Equação 2.14, reduz-se a:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (2.15)$$

A solução analítica da Equação 2.15 com origem no centro e ambos os lados expostos ao resfriamento é dada por Schneider, citado por MOHSENIN (1980), da forma que segue:

$$\frac{(T - T_a)}{(T_i - T_a)} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{\text{sen} \mu_n}{\mu_n + \text{sen} \mu_n \cos \mu_n} \right) \exp \left[ - \left( \frac{\mu_n^2 \alpha}{x_m^2} \right) t \right] \cos \left( \mu_n \frac{x}{x_m} \right), \quad (2.16)$$

em que:

$$\mu_n - \text{raízes de } \mu_n \text{tg} \mu_n = \frac{hx_m}{k};$$

$x_m$  - metade da espessura, m;

$x$  - distância do centro, m.

O subscrito  $n$  representa o enésimo termo correspondente à enésima solução da equação.

#### 2.4.2.2. A Lei de Fourier em coordenadas cilíndricas

A Equação de Fourier em coordenadas cilíndricas é semelhante à Equação 2.13 e, segundo Rohsenow citado por MOHSENIN (1980), é expressa como a seguir:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_i}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.17)$$

em que  $r$  é a distância radial,  $\phi$  é o ângulo polar e  $z$  é a distância axial.

Se o material não possui fonte interna de calor e a condutividade térmica  $k$  é constante, a Equação 2.17, comparável a Equação 2.14, para um cilindro infinito, é reduzida para:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (2.18)$$

Quando há somente gradientes de temperatura no sentido radial, a Equação 2.18 é apresentada da seguinte forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = \alpha \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad (2.19)$$

Para um cilindro sólido infinito ou um cilindro finito com extremidades isoladas, a solução analítica da Equação 2.19, de acordo com Schneider, citado por MOHSENIN (1980), é:

$$\frac{(T - T_a)}{(T_i - T_a)} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n} \left( \frac{J_1 \mu_n}{J_0^2 \mu_n + J_1^2 \mu_n} \right) \exp \left[ - \left( \frac{\mu_n^2 \alpha}{r_m^2} \right) t \right] J_0 \left( \mu_n \frac{r}{r_m} \right), \quad (2.20)$$

sendo  $\mu_n$  as raízes para os enésimos valores, em que

$$\mu_n \left( \frac{J_1 \mu_n}{J_0 \mu_n} \right) = \frac{hr_m}{k}, \quad (2.21)$$

$r_m$  é o raio do cilindro,  $r$  é a distância do centro e  $J_1$  e  $J_2$  correspondem a ordem da função de Bessel.

### 2.4.2.3. A Lei de Fourier em coordenadas esféricas

A Equação de Fourier para condução em coordenadas esféricas é comparável à Equação 2.13 e é expressa de acordo com Rohsenow, citado por MOHSENIN (1980), como segue:

$$\frac{1}{r^2} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \sin \phi \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{\sin^2 \phi} \frac{\partial^2 T}{\partial \psi^2} \right] + \frac{q_i}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.22)$$

em que  $\phi$  e  $\psi$  são ângulos de longitude e latitude, respectivamente.

Em um material, sem fonte de calor interna e condutividade térmica,  $k$ , constante, a Equação de Fourier para sólidos esféricos reduz-se a:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r^2} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \sin \phi \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{\sin^2 \phi} \frac{\partial^2 T}{\partial \psi^2} \right] \quad (2.23)$$

Quando não há variação da temperatura  $T$  com  $\phi$  e  $\psi$ , a Equação 2.23 reduz-se para:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r^2} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = \frac{\alpha}{r^2} \left[ 2r \frac{\partial T}{\partial r} + r^2 \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad (2.24)$$

Apaci, citado por MOHSENIN (1980), apresenta a solução analítica da Equação 2.24, que é dada por:

$$\frac{(T - T_a)}{(T_i - T_a)} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n}{\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n} \right) \exp \left[ - \left( \frac{\mu_n^2 \alpha}{r_m^2} \right) t \right] \left[ \frac{\sin \left( \mu_n \frac{r}{r_m} \right)}{\left( \mu_n \frac{r}{r_m} \right)} \right], \quad (2.25)$$

em que  $\mu_n$  é definido por:

$$\frac{\mu_n}{\operatorname{tg} \mu_n} = 1 - \frac{hr_m}{k} \quad (2.26)$$

Na Equação 2.25,  $r_m$  é raio da esfera, em m, e  $r$  é a distância a partir do centro, em m.

Para temperatura no centro do material, quando  $r = 0$ , a Equação 2.25 é simplificada para:

$$\frac{(T - T_a)}{(T_i - T_a)} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{\text{sen} \mu_n - \mu_n \text{cos} \mu_n}{\mu_n - \text{sen} \mu_n \text{cos} \mu_n} \right) \exp \left[ - \left( \frac{\mu_n^2 k}{c_p \rho r_m^2} \right) t \right], \quad (2.27)$$

em que em que  $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$  é a difusividade térmica.

## 2.5. Parâmetros físicos relacionados à transferência de calor

De acordo com SIMÕES (1997) as propriedades térmicas dos materiais biológicos são de grande importância nos processos de aquecimento, resfriamento e secagem, como também nos projetos de equipamentos, e acrescenta que, com o aumento da quantidade de alimentos processados na indústria, aumenta a necessidade de conhecer estas propriedades que nem sempre se encontram disponíveis na literatura.

Para RESENDE & SILVEIRA Jr. (2002), o conhecimento das propriedades termofísicas de alimentos é relevante e necessário para o desenvolvimento de cálculos referentes à transferência de calor e que estão relacionados a projetos de equipamentos de refrigeração e armazenamento de alimentos.

Estes autores acrescentam que estas propriedades são essenciais para a simulação da variação da temperatura no interior dos alimentos durante o resfriamento e congelamento e são também importantes para as estimativas do tempo de resfriamento e congelamento e da carga térmica do produto no ambiente no qual este deve ser armazenado.

### 2.5.1. Condutividade térmica

Para RAHMAN (1992), uma das mais importantes propriedades térmicas de alimentos é a condutividade térmica que é usada na análise de processos que envolvem a transferência de energia ou calor, como a secagem e o resfriamento. Este parâmetro

diminui com o decréscimo do conteúdo de água (RAHMAN et al., 1997; MAROULIS et al., 2002).

De acordo com MOHSENIN (1980), a troca de calor na superfície de produtos biológicos durante um processo térmico é muito mais rápida que no interior destes, ou seja, a condutância da superfície,  $h$ , é muito maior que a condutividade térmica,  $k$ , o que acarreta um considerável gradiente de temperatura entre a superfície e o interior dos produtos. Com isso, a razão  $k/h$  aproxima-se de zero, tornando viável a utilização das cartas de Gurney e Lurie, em que é possível determinar a condutividade térmica usando o número de Fourier,  $F_0$ , por meio da Equação 2.28.

$$F_0 = \frac{kt}{\rho c_p r^2} \quad (2.28)$$

em que:

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

$t$  - tempo de duração do processo, h;

$\rho$  - massa específica do produto,  $\text{kg m}^{-3}$ ;

$c_p$  - calor específico do produto,  $\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$r$  - raio do produto, m.

Nos processos de transferência de calor por condução, em estado estacionário, o calor transmitido,  $Q$ , através de um sólido é diretamente proporcional à área de transmissão,  $A$ , e ao incremento de temperatura,  $\Delta T$ , e inversamente proporcional à espessura do sólido,  $e$ , como é observado na Equação 2.29, em que a condutividade térmica,  $k$ , é a constante de proporcionalidade (IBARZ & BARBOSA-CÁNOVAS, 1999).

$$Q = k \frac{A\Delta T}{e} \quad (2.29)$$

QUEIROZ (1994) utilizou o método da fonte linear de calor para a medição da condutividade térmica em regime transiente. Uma fonte de calor é inserida no sólido com comprimento considerado infinito e diâmetro infinitesimal como um fio delgado, elevando sua temperatura após um intervalo de tempo. A condutividade térmica é então

medida em função do aumento de temperatura do material, de acordo com a Equação 2.30.

$$k = \frac{Q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (2.30)$$

em que:

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

$Q$  - calor cedido ao produto, J;

$T_1$  - temperatura inicial do produto,  $^\circ\text{C}$ ;

$T_2$  - temperatura final do produto,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_1$  - tempo inicial, s;

$t_2$  - tempo final, s.

OLIVEIRA et al. (2001) utilizaram o método da fonte linear de calor na medição da condutividade térmica do suco de laranja e observaram resultados semelhantes aos encontrados na literatura para outros produtos.

TELIS-ROMERO et al. (1998) determinaram a condutividade térmica do suco de laranja em função da temperatura e do conteúdo de água, e observaram um aumento desse parâmetro com o aumento da temperatura em um conteúdo de água constante e com o conteúdo de água a uma mesma temperatura.

### 2.5.2. Difusividade térmica

A difusividade térmica é um parâmetro que estabelece a rapidez com que o calor difunde-se no material, bem como o grau de dependência que existe entre a temperatura e o tempo para uma determinada condição do produto (SILVA, 2002).

Este parâmetro pode ser determinado a partir do número de Fourier, por meio da Equação 2.31 (BECKER & FRICKE, 2004):

$$\alpha = \frac{F_0 r_m^2}{t} \quad (2.31)$$

em que:

$\alpha$  - difusividade térmica do produto,  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ;

$t$  - tempo de duração do processo, s;

$r_m$  - raio do produto, m;

$F_0$  - número de Fourier.

BECKER & FRICKE (2004), apresentam o número de Fourier em função do coeficiente ou taxa de resfriamento,  $C$ , do tempo de resfriamento,  $t$ , e da raiz da Equação de Fourier,  $\mu_n$ , como apresentado na Equação 2.32.

$$F_0 = \frac{Ct}{\mu_n^2} \quad (2.32)$$

A acerola submetida a três diferentes temperaturas de congelamento (- 22,6, - 100,0 e - 196,0 °C) apresentou valores de difusividade térmica de 1,09, 6,67 e 4,60  $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$ , respectivamente, na fase de resfriamento, não verificando nenhuma relação definida desta propriedade com a temperatura (ARAÚJO, 2000).

FERREIRA (2000) ao estudar o efeito do congelamento sobre as características físico-químicas da polpa de umbu a três temperaturas de congelamento (- 22,6, - 110,0 e - 196,0 °C) obteve valores para a difusividade térmica de 0,95, 3,36 e 1,68  $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$ , respectivamente, durante a fase de resfriamento, não observando relação direta com a temperatura nesta fase.

SILVA (2002) verificou uma relação de aumento da difusividade térmica com a redução da temperatura ao estudar a cinética de resfriamento do fruto cajá. QUEIROZ (1994) estudou o resfriamento de umbu em seis temperaturas distintas e não observou nenhuma relação definida entre a difusividade térmica e a temperatura de resfriamento, para a faixa de temperatura estudada.

### 2.5.3. Taxa de resfriamento

O cálculo da taxa de resfriamento pode ser feito usando dados de tempo e temperatura, e este parâmetro pode ser utilizado para obter o valor da temperatura após

um determinado tempo, ou o tempo necessário para o produto atingir uma determinada temperatura (MOHSENIN, 1980).

Para um resfriamento que segue a Lei de Newton, a Equação 2.11 pode ser usada para determinar a taxa de resfriamento de um produto. A taxa de resfriamento, nesta equação, é representada pelo parâmetro  $hA(c_p\rho V)^{-1}$  e é denominada coeficiente de resfriamento (MOHSENIN, 1980).

Este autor cita dois métodos para a determinação da taxa de resfriamento. O primeiro consiste em usar a inclinação da curva de resfriamento no gráfico da taxa adimensional de temperatura  $(T_i - T_a) / (T - T_a)$  em escala logarítmica na vertical, e o tempo  $t$  na escala aritmética horizontal, em papel semi-log. Se a variação de temperatura seguir a forma exponencial da Equação 2.11, obtém-se uma linha reta com intercessão no eixo  $y$  e a inclinação da reta será a quantidade  $hA(c_p\rho V)^{-1}$ . De acordo com esta interpretação, a Equação 2.10 pode ser escrita como:

$$C = \frac{\ln\left(\frac{(T_i - T_a)}{(T - T_a)}\right)}{t}, \quad (2.33)$$

em que:

$C$  - taxa de resfriamento,  $s^{-1}$ ;

$t$  - tempo, s;

$T_i$  - temperatura inicial do produto, °C;

$T_a$  - temperatura do meio de resfriamento, °C;

$T$  - temperatura do produto em um instante de tempo  $t$ , °C.

O segundo método consiste em usar a média logarítmica da diferença de temperatura entre o produto e o ambiente. A expressão média logarítmica para a taxa de resfriamento é obtida reescrevendo a Equação 2.33 da seguinte forma:

$$C = \frac{\frac{(T_i - T)}{t}}{\frac{(T_i - T_a) - (T - T_a)}{\ln((T_i - T_a)/(T - T_a))}} \quad (2.34)$$

#### 2.5.4. Tempo de meio resfriamento

O tempo de meio resfriamento é um parâmetro relacionado com a taxa de resfriamento e é definido como o tempo no qual a diferença de temperatura entre o produto e o meio é reduzida pela metade. Este parâmetro é geralmente expresso em horas ou minutos e refere-se ao intervalo necessário para o produto ser resfriado comercialmente, podendo ser representado por  $z$ ,  $2z$  ou  $3z$ , conforme represente a diferença de temperatura entre o produto e o meio pela metade de um quarto ou um oitavo da diferença inicial de temperatura (QUEIROZ, 1994).

O tempo de meio resfriamento pode ser estimado quando os dados de temperatura em função do tempo são disponíveis, pela observação direta dos dados de resfriamento (SILVA, 2002).

Quando a diferença de temperatura entre um material e o ambiente de resfriamento atinge  $1/8$  da diferença em relação à temperatura inicial tem-se o tempo dos sete oitavos do resfriamento, que, de acordo com TERUEL et al. (2003), ocorre quando a taxa adimensional de temperatura é igual a 0,125.

TERUEL et al. (2001) obtiveram tempos de resfriamento entre 127,5 e 185,0 min (meio resfriamento) e entre 362,5 e 460,0 (sete-oitavos de resfriamento) quando submeteram laranjas da variedade valência ao resfriamento em câmara convencional a uma temperatura de 1,0 °C.

#### 2.5.5. Fator de atraso

O fator de atraso,  $J$ , representa o coeficiente de intersecção com o eixo de temperaturas da porção linear da curva de resfriamento de um material. Porém, a avaliação deste parâmetro pelo método gráfico é geralmente imprecisa, a menos que a curva de resfriamento apresente uma porção favoravelmente reta. Quando o material não apresenta forma bem definida, o traçado da linha reta torna-se sujeito a imprecisão e qualquer variação no traçado da linha acarreta grandes variações no valor de  $J$ . Este parâmetro é também afetado significativamente quando há erros na colocação do termopar (QUEIROZ, 1994).

Se houver uma convergência rápida da série dada pela Equação 2.27, todos os termos, após o primeiro, tornam-se desprezíveis e o resultado leva a solução obtida por Airton e Perry, citados por MOHSENIN (1980), de acordo com a Equação 2.35.

$$\frac{(T - T_a)}{(T_i - T_a)} = J \exp\left[-\left(\frac{1}{f}\right)t\right] \quad (2.35)$$

em que

$$J = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{\text{sen} \mu_n - \mu_n \text{COS} \mu_n}{\mu_n - \text{sen} \mu_n \text{COS} \mu_n} \right) \quad (2.36)$$

e

$$\frac{1}{f} = \frac{\mu_n^2 \alpha}{r_m^2}, \quad (2.37)$$

$J$  é o fator de atraso e  $1/f$  representa a taxa de resfriamento do objeto.

### 2.5.6. Coeficiente convectivo de transferência de calor

O projeto de sistemas de resfriamento, armazenamento e congelamento requer uma estimativa do tempo necessário para que o produto atinja a temperatura desejada ou a temperatura recomendada. A precisão do cálculo depende também da determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor no processo de resfriamento ou congelamento (BECKER & FRICKE, 2004).

O coeficiente de transferência de calor define a taxa de transferência de calor por grau de diferença de temperatura através da interface fluido-sólido e por unidade de área da superfície do sólido. Dessa forma, ele pode ser considerado o fator de proporcionalidade na equação de convecção (MOHSENIN, 1980).

$$q = hA\Delta T \quad (2.38)$$

em que:

$h$  - coeficiente de transferência de calor,  $\text{W m}^{-2} \text{°C}^{-1}$ ;

$q$  - taxa de transferência de calor,  $\text{J s}^{-1}$ ;

$A$  - área efetiva da superfície,  $\text{m}^2$ ;

$\Delta T$  - gradiente de temperatura,  $\text{°C}$ .

Este coeficiente é influenciado pela densidade, viscosidade, calor específico, condutividade térmica, velocidade e temperatura média do fluido. É um parâmetro físico dependente das propriedades térmicas e de fluxo do fluido. Os parâmetros físicos do sólido que afetam o coeficiente de transferência de calor são aqueles que influenciam o movimento do fluido em torno do sólido, como: forma, tamanho, área da superfície, rugosidade da superfície, arranjo de embalagem de sólidos e suas exposições ao fluido que o envolve (MOHSENIN, 1980).

De acordo com BECKER & FRICKE (2004) dois casos podem ser considerados para determinar o coeficiente de transferência de calor na superfície:  $B_i \leq 0,1$  e  $B_i > 0,1$ . O número de Biot é a relação entre a resistência à transferência de calor externa e a resistência à transferência de calor interna do material, e é definido por:

$$B_i = \frac{hL}{k}, \quad (2.39)$$

em que:

$B_i$  - número de Biot;

$h$  - coeficiente de transferência de calor na superfície,  $W m^{-2} ^\circ C^{-1}$ ;

$L$  - dimensão característica, m;

$k$  - condutividade térmica,  $W m^{-1} ^\circ C^{-1}$ .

Para um material com forma esférica tem-se  $L = r_m$  e a Equação 2.39 pode ser escrita da seguinte forma:

$$B_i = \frac{hr_m}{k}, \quad (2.40)$$

Um número de Biot menor ou igual a 0,1 ( $B_i \leq 0,1$ ) indica que a resistência interna à transferência de calor é desprezível, sendo que a temperatura do objeto é uniforme em qualquer instante de tempo. Quando o número de Biot é maior que 0,1 ( $B_i > 0,1$ ), a resistência interna à transferência de calor não é desprezível e há um gradiente de temperatura no sólido. Neste caso, em que há um gradiente de temperatura, o coeficiente convectivo de transferência de calor pode ser determinado por meio do ajuste da curva de resfriamento do produto (BECKER & FRICKE, 2004).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

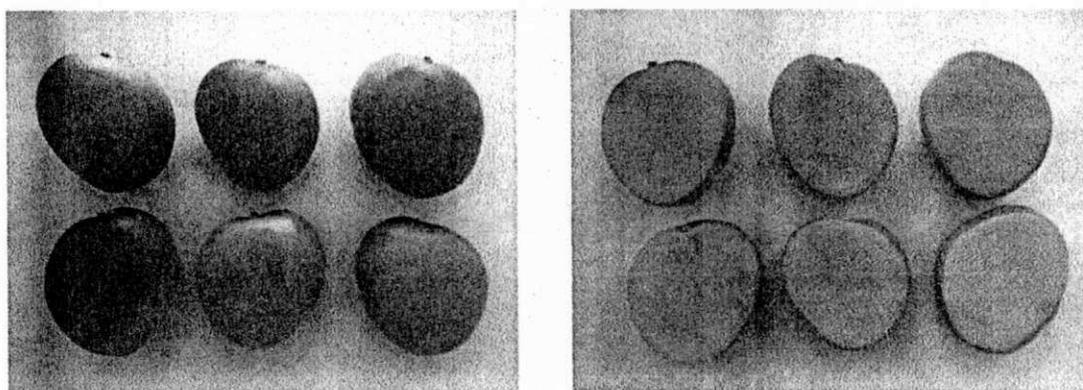
O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

#### 3.1. Matéria prima

A matéria prima utilizada foi manga variedade Tommy Atkins produzida na região do Vale do São Francisco no município de Petrolina - PE e adquirida na CEASA em Campina Grande - PB no período de setembro a outubro de 2004.

Para a escolha da fruta foram considerados os aspectos relacionados à maturação e às condições de qualidade, de acordo com os padrões exigidos para comercialização no mercado interno e externo.

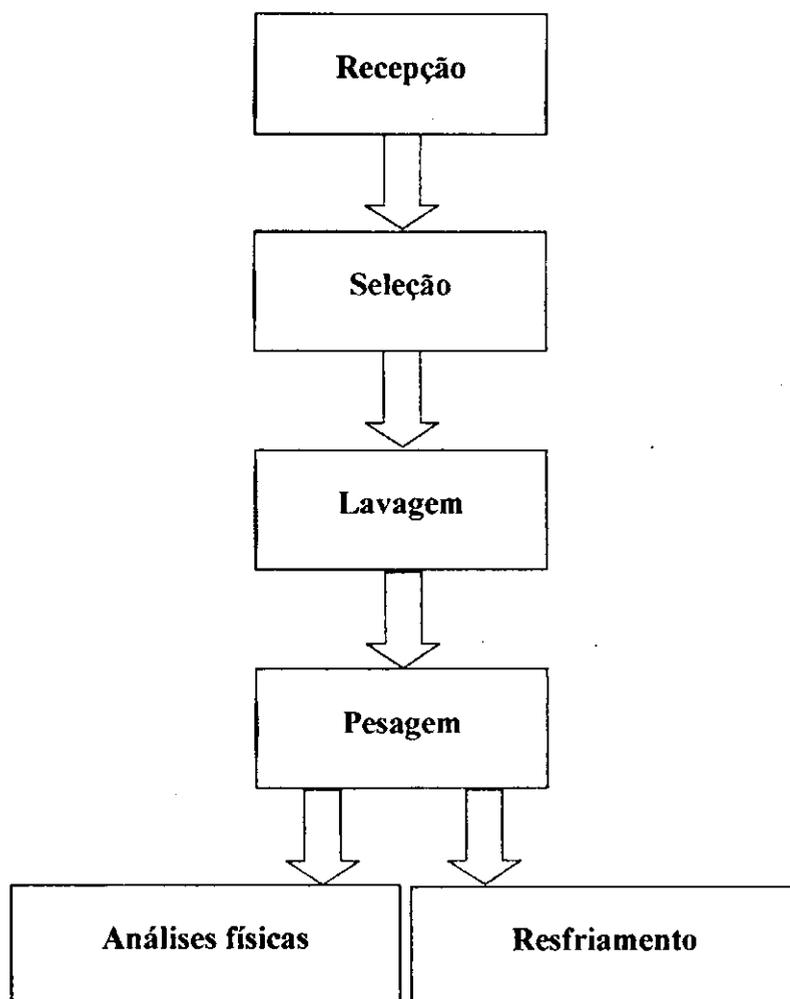
Os frutos utilizados encontravam-se no estágio de maturação meio maduro, com maior parte da casca amarela clara e verde, e parte vermelha, com polpa consistente e amarela. Na Figura 3.1 apresenta-se uma amostra dos frutos usados no estudo experimental, destacando-se os aspectos externos e internos referentes ao grau de maturação.



**Figura 3.1.** Estádio de maturação dos frutos usados no experimento.

### 3.2. Preparação da matéria prima

As operações realizadas na preparação das frutas apresentam-se no fluxograma da Figura 3.2



**Figura 3.2.** Fluxograma de preparação dos frutos.

Ao chegar no laboratório, as frutas foram inicialmente selecionadas de forma manual com a finalidade de eliminar frutos com danos mecânicos ou estragados e em estágio de maturação inadequado, selecionando os de melhor aparência física de acordo com a cor da casca, forma e textura.

Após esta seleção inicial, os frutos foram lavados manualmente em água corrente para limpeza da casca e retirada do látex.

Posteriormente, determinou-se a massa das frutas em balança digital (marca “Marte”, modelo AS 5500C), precisão de 0,01 g, selecionando aquelas com padrões de exportação (250,0 a 750,0 g para Europa e 250,0 a 650,0 g para os Estados Unidos da América), sendo escolhidos os frutos com massas entre 450,0 e 550,0 g.

Após estas etapas de preparação, os frutos foram destinados à caracterização física e ao resfriamento.

### 3.3. Caracterização física

As dimensões, massa e forma foram obtidas em um espaço amostral com cinquenta frutas. O volume, a massa específica, o conteúdo de água, a circularidade, a esfericidade e a resistência foram obtidos em dez repetições, enquanto que o calor específico e as cinzas foram determinados em cinco repetições.

#### 3.3.1. Dimensões

As frutas foram medidas utilizando um paquímetro digital (marca “Starret” 727 - 2001), precisão de 0,01 mm. Mediram-se os três eixos mutuamente perpendiculares: diâmetro maior, diâmetro intermediário e diâmetro menor.

A partir dos três diâmetros medidos obtiveram-se os três raios correspondentes para determinação do volume equivalente do produto, por meio da Equação 3.1.

$$V_e = \frac{4}{3} \pi R_1 R_2 R_3 \quad (3.1)$$

em que:

$V_e$  - volume equivalente a uma esfera,  $\text{cm}^3$ ;

$R_1$  - raio maior, cm;

$R_2$  - raio intermediário, cm;

$R_3$  - raio menor, cm.

Com o volume equivalente fez-se a determinação do raio equivalente do produto, que é o raio equivalente a uma esfera de mesmo volume, a partir da Equação 3.2, para ser usado na Equação de Fourier.

$$R_e = \sqrt[3]{\frac{1}{\pi} \frac{3}{4} V_e} \quad (3.2)$$

em que  $R_e$  é o raio equivalente a uma esfera, cm.

A espessura máxima da polpa foi obtida a partir da introdução de uma haste fina na parte mais espessa da fruta e medindo-se a profundidade com o paquímetro (Figura 3.3). Com o raio equivalente e a espessura máxima da polpa, obteve-se a distância média do centro (ponto 1) à superfície da semente do produto, no ponto onde eram feitas as leituras das temperaturas (ponto 2), utilizando-se a Equação 3.3.

$$r = R_e - E_p \quad (3.3)$$

em que:

$r$  - distância média do centro à superfície da semente, cm;

$E_p$  - espessura máxima da polpa, cm.

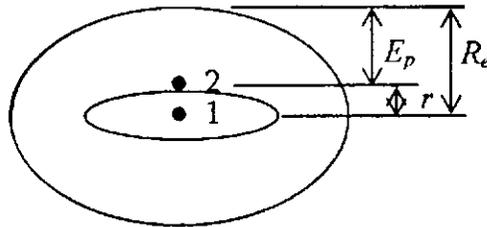


Figura 3.3. Dimensões medidas nos frutos.

### 3.3.2. Massa

As massas das frutas foram medidas em uma balança digital (marca “Marte”, modelo AS 5500C), precisão de 0,01 g.

### 3.3.3. Volume

Na determinação do volume utilizou-se o método da balança de plataforma, de acordo com MOHSENIN (1978), em que a amostra foi presa a uma haste e totalmente

mergulhada em um recipiente com água destilada sobre uma balança. O volume foi então obtido dividindo-se a massa de água deslocada pela massa específica da água, como apresentado na Equação 3.4.

$$V = \frac{m_a}{\rho_a} \quad (3.4)$$

em que:

$V$  - volume do fruto,  $\text{cm}^3$ ;

$m_a$  - massa de água deslocada, g;

$\rho_a$  - massa específica da água,  $\text{g cm}^{-3}$ .

#### 3.3.4. Massa específica

A massa específica foi calculada dividindo-se a massa do produto por seu volume (Equação 3.5).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.5)$$

em que:

$\rho$  - massa específica do produto,  $\text{g cm}^{-3}$ ;

$m$  - massa do produto, g;

$V$  - volume do produto,  $\text{cm}^3$ .

#### 3.3.5. Conteúdo de água

O conteúdo de água em base úmida foi determinado pelo método gravimétrico (AOAC, 1992). As amostras com massa de aproximadamente 100,0 g foram colocadas em estufa à temperatura de 105,0 °C, sendo pesadas em intervalos de tempo regulares até a amostra atingir massa constante em duas pesagens consecutivas, obtendo-se a massa seca. O conteúdo de água foi obtido por meio da Equação 3.6.

$$X_{wu} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (3.6)$$

em que:

$X_{wu}$  - conteúdo de água base úmida, %;

$m_i$  - massa inicial da amostra, g;

$m_f$  - massa final da amostra, g.

### 3.3.6. Circularidade

A determinação da circularidade foi realizada por meio da razão entre a área projetada do produto e a área do menor círculo que a circunscribe (Equação 3.7), de acordo com CAVALCANTI MATA & FERNANDES FILHO (1984). Na obtenção da área projetada utilizou-se um retroprojetor, em que o fruto foi colocado na posição de repouso e a área de sua projeção medida em um papel milimetrado.

$$\varphi = \frac{A_p}{A_c} \times 100 \quad (3.7)$$

em que:

$\varphi$  - circularidade, %;

$A_p$  - maior área projetada do objeto na posição de repouso,  $\text{cm}^2$ ;

$A_c$  - área do menor círculo que circunscribe a projeção,  $\text{cm}^2$ .

### 3.3.7. Esfericidade

A esfericidade foi obtida pela relação entre o diâmetro da maior circunferência inscrita e o diâmetro da menor circunferência que circunscribe a projeção da fruta na posição de repouso (Equação 3.8), como apresentado em MOHSENIN (1978).

$$E = \frac{D_i}{D_c} \times 100 \quad (3.8)$$

em que:

$E$  - esfericidade, %;

$D_i$  - diâmetro do maior círculo inscrito, cm;

$D_c$  - diâmetro do menor círculo circunscrito, cm.

### 3.3.8. Índice de firmeza

Para determinação do índice de firmeza utilizou-se um penetrômetro manual (marca "Sato Ag.", modelo FT - 327), com uma haste de 8,0 mm de diâmetro. As perfurações foram feitas na polpa da fruta, a uma profundidade de 7,8 mm. O índice de firmeza foi obtido pela relação entre a leitura do penetrômetro e a área da seção transversal da haste (Equação 3.9).

$$R_s = \frac{M}{A} \quad (3.9)$$

em que:

$R_s$  - índice de firmeza,  $\text{kg cm}^{-2}$ ;

$M$  - leitura do penetrômetro, kg;

$A$  - área da seção transversal,  $\text{cm}^2$ .

### 3.3.9. Calor específico

O calor específico foi determinado pelo método das misturas (MOHSENIN, 1978) utilizando um calorímetro construído no próprio laboratório, composto de uma garrafa térmica, isolada com lã de vidro, colocada dentro de um tubo de PVC com diâmetro conhecido e vedada com uma rolha de borracha.

Inicialmente colocou-se cerca de 100,0 g de água destilada à temperatura ambiente no calorímetro, agitando-o por um período de aproximadamente 3,0 min e medindo-se a temperatura com um termopar ( $T_1$ ). Em seguida adicionou-se 100,0 g de água a temperatura conhecida ( $T_2$ ), igual a 5,0 °C, e um novo equilíbrio foi estabelecido ( $T_3$ ). Assim, a capacidade calorífica do calorímetro foi determinada pela Equação 3.10.

$$c_e m_1 (T_1 - T_3) + c_{cal} (T_1 - T_3) = c_e m_2 (T_3 - T_2) \quad (3.10)$$

em que:

$c_{cal}$  - capacidade calorífica do calorímetro, cal °C<sup>-1</sup>;

$c_e$  - calor específico da água, cal (g°C)<sup>-1</sup>;

$m_1$  - massa da água à temperatura ambiente, g;

$m_2$  - massa da água fria, g;

$T_1$  - temperatura da água ambiente, °C;

$T_2$  - temperatura da água fria, °C;

$T_3$  - temperatura de equilíbrio entre  $T_1$  e  $T_2$ , °C.

Em seguida, a amostra com aproximadamente 100,0 g e temperatura conhecida ( $T_4$ ), foi colocada no calorímetro, que foi agitado por mais 3,0 min, sendo estabelecida uma nova temperatura de equilíbrio ( $T_5$ ). O calor específico da amostra foi calculado por meio da Equação 3.11.

$$c_p m_p (T_4 - T_5) = c_e m_1 (T_5 - T_3) + c_{cal} (T_5 - T_3), \quad (3.11)$$

sendo:

$c_p$  - calor específico do produto, cal (g°C)<sup>-1</sup>;

$m_p$  - massa do produto, g;

$T_4$  - temperatura do produto, °C;

$T_5$  - temperatura de equilíbrio entre a massa de água e o produto, °C.

### 3.3.10. Cinzas

Na determinação das cinzas utilizaram-se as normas do IAL (1976). As amostras com massa de 100,0 g foram colocadas em cadinhos de porcelana e levadas a uma chapa aquecedora para retirada do excesso de água. Posteriormente, foram postas em uma mufla a temperatura de 525,0 °C por 24,0 h. Após este período, transferiu-as para um dessecador, onde permaneceram por 1,0 h, sendo pesadas em seguida. As cinzas foram calculadas pela Equação 3.12.

$$C_z = \frac{m_s}{m_i} \times 100 \quad (3.12)$$

em que:

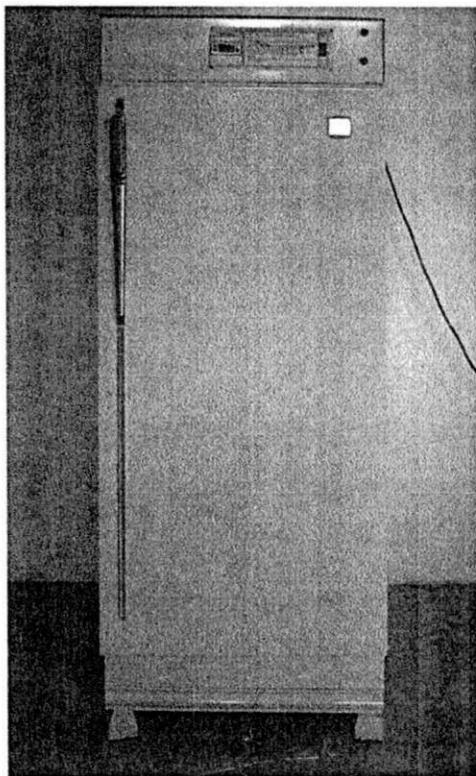
$C_z$  - cinzas, %;

$m_s$  - massa da amostra seca, g;

$m_i$  - massa inicial da amostra, g.

### 3.4. Resfriamento das frutas

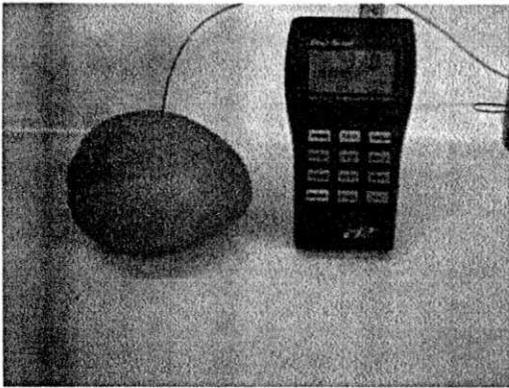
As frutas foram resfriadas até as temperaturas de 6,0; 8,0; 10,0; 12,0; 14,0 e 16,0 °C, em uma câmara de refrigeração convencional composta de um evaporador localizado na parte superior, um pequeno ventilador para uniformizar o ar na parte interna, painel digital para leitura e controle da temperatura, faixa de operação entre – 6,0 e 60,0 °C, precisão de 0,10 °C e variação média de 1,20 °C. Na Figura 3.4 está apresentada a câmara de refrigeração utilizada no experimento.



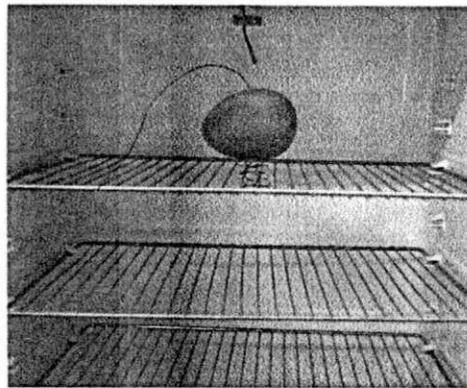
**Figura 3.4.** Câmara de refrigeração.

A medição de temperatura foi realizada com a introdução de um termopar do tipo K (CHROMEL - ALUMEL), conectado a um registrador multicanal (marca “Digi-sensi”), precisão de 0,10 °C, no interior de cada fruto individualmente, no plano perpendicular ao eixo longitudinal do fruto junto à superfície da semente, a uma distância de aproximadamente 3,0 cm do pedúnculo, na parte de maior espessura da polpa (Figura 3.5). Em seguida, a fruta foi colocada sobre um pequeno suporte de tela no interior da câmara para iniciar o resfriamento e observar a redução de temperatura

com o tempo (Figura 3.6). As anotações dos dados de temperatura e tempo foram feitas em intervalos de cinco minutos, em que o primeiro valor referia-se ao tempo em que se iniciava o resfriamento e à temperatura inicial do fruto, sendo finalizada as leituras quando a temperatura no interior do fruto, apresentada no registrador digital, atingia a temperatura de resfriamento da câmara. Todas as determinações para cada temperatura foram realizadas em três repetições.

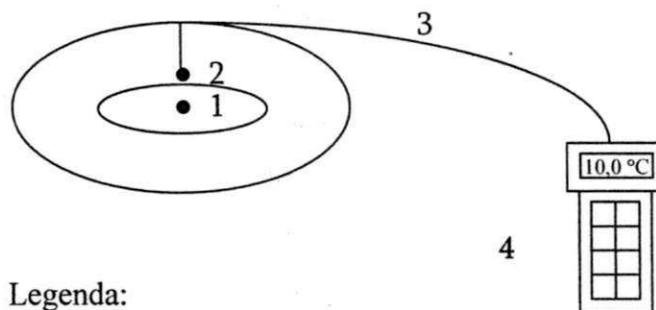


**Figura 3.5.** Termopar no interior da fruta conectado ao registrador de temperatura.



**Figura 3.6.** Fruta na câmara de refrigeração.

Um esboço detalhado do termopar no interior do fruto e conectado ao registrador de temperatura é apresentado na Figura 3.7.



Legenda:

- 1 - centro da fruta;
- 2 - ponto de medição da temperatura;
- 3 - termopar;
- 4 - registrador de temperatura.

**Figura 3.7.** Detalhe do termopar no interior do fruto.

Durante o resfriamento, para cada nível de temperatura, foi colocado um termopar no interior da câmara, próximo à fruta, para aferição e verificação da temperatura do ar de resfriamento. As medições desta temperatura foram feitas a cada instante que se coletava a temperatura do fruto. Na Tabela 3.1 encontram-se apresentadas as temperaturas médias na câmara de refrigeração para cada temperatura do ar de resfriamento durante a realização do resfriamento. Observa-se que não houve praticamente nenhuma variação da temperatura média no interior da câmara em relação à temperatura do ar.

**Tabela 3.1.** Temperaturas médias na câmara de refrigeração durante o resfriamento.

Temperatura do ar de resfriamento (°C)	Temperatura média (°C)	DP (°C)	CV (%)
6,0	5,95	0,58	9,83
8,0	7,99	0,40	4,98
10,0	10,05	0,60	6,02
12,0	12,10	0,70	5,81
14,0	14,03	0,63	4,50
16,0	15,97	0,70	4,37

DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

A umidade relativa média no interior da câmara de refrigeração foi medida com um higrômetro digital (marca INSTRUTHERM, modelo THAR - 185), precisão de 0,01%. Os valores médios da umidade relativa para cada nível de temperatura estão apresentados na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2.** Umidade relativa média na câmara de refrigeração.

Temperatura ajustada (°C)	UR (%)
6,0	72,60
8,0	72,05
10,0	72,35
12,0	72,65
14,0	73,10
16,0	74,50
Média	72,88
DP	0,87
CV	1,19

UR - umidade relativa; DP - desvio padrão;

CV - coeficiente de variação.

Na análise dos dados fez-se o cálculo da taxa adimensional de temperatura nas três repetições para cada temperatura do ar de resfriamento. Com a taxa adimensional média de temperatura e o tempo de resfriamento foi realizada a regressão não linear dos dados experimentais utilizando a solução analítica da Equação de Fourier em coordenadas esféricas com medição da temperatura a uma distância  $r$  do centro do produto (Equação 2.25). Esta Equação foi reescrita substituindo-se o raio da esfera,  $r_m$ , pelo raio equivalente do produto,  $R_e$ , de acordo com a Equação 3.13.

$$\frac{(T - T_a)}{(T_i - T_a)} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{\text{sen} \mu_n - \mu_n \cos \mu_n}{\mu_n - \text{sen} \mu_n \cos \mu_n} \right) \exp \left[ - \left( \frac{\mu_n^2 \alpha}{R_e^2} \right) t \right] \left[ \frac{\text{sen} \left( \mu_n \frac{r}{R_e} \right)}{\left( \mu_n \frac{r}{R_e} \right)} \right] \quad (3.13)$$

A análise de regressão foi realizada desprezando-se os termos da série após o primeiro, reduzindo a Equação 3.13 para:

$$\frac{(T - T_a)}{(T_i - T_a)} = 2 \left( \frac{\text{sen} \mu_1 - \mu_1 \cos \mu_1}{\mu_1 - \text{sen} \mu_1 \cos \mu_1} \right) \exp \left[ - \left( \frac{\mu_1^2 \alpha}{R_e^2} \right) t \right] \left[ \frac{\text{sen} \left( \mu_1 \frac{r}{R_e} \right)}{\left( \mu_1 \frac{r}{R_e} \right)} \right], \quad (3.14)$$

Na regressão não linear dos dados experimentais utilizou-se o programa computacional STATISTICA 6.0, sendo que a Equação 3.14 foi simplificada resultando na Equação 3.15, usada na simulação dos dados.

$$TAT = J' \exp(-Ct) \quad (3.15)$$

sendo:

$$TAT = \frac{(T - T_a)}{(T_i - T_a)}, \quad (3.16)$$

$$J' = 2 \left( \frac{\text{sen} \mu_1 - \mu_1 \cos \mu_1}{\mu_1 - \text{sen} \mu_1 \cos \mu_1} \right) \left[ \frac{\text{sen} \left( \mu_1 \frac{r}{R_e} \right)}{\left( \mu_1 \frac{r}{R_e} \right)} \right] \quad (3.17)$$

e

$$C = \frac{\mu_1^2 \alpha}{R_e^2}, \quad (3.18)$$

em que:

$TAT$  - taxa adimensional de temperatura;

$C$  - taxa de resfriamento,  $s^{-1}$ ;

$J'$  - fator de atraso, adimensional;

$T$  - temperatura após um instante de tempo  $t$ , °C;

$T_a$  - temperatura de resfriamento da câmara, °C.

$T_i$  - temperatura inicial do fruto, °C.

$\mu_1$  - raiz da equação;

$t$  - tempo de resfriamento, s.

$r$  - distância do centro à superfície da semente, m;

$R_e$  - raio equivalente do produto, m.

$\alpha$  - difusividade térmica,  $m^2 s^{-1}$ .

As curvas de resfriamento, com a taxa adimensional média de temperatura e o tempo de resfriamento, foram plotadas para cada nível de temperatura.

A precisão dos ajustes entre os dados experimentais e os valores calculados na análise de regressão foi avaliada por meio do coeficiente de determinação,  $R^2$ , e do desvio médio relativo,  $P$ , que é a média da diferença relativa entre os valores experimentais e os preditos na equação (Equação 3.19).

$$P = \frac{100}{n_e} \sum_{i=1}^n \frac{|(V_e - V_i)|}{V_e}, \quad (3.19)$$

em que:

$P$  - desvio médio relativo, %;

$n_e$  - número de dados experimentais;

$V_i$  - valores preditos ou calculados;

$V_e$  - dados experimentais.

### 3.5. Determinação dos parâmetros físicos de transferência de calor

#### 3.5.1. Taxa de resfriamento

A taxa de resfriamento,  $C$ , foi determinada diretamente na regressão dos dados experimentais, utilizando-se a solução da Equação de Fourier na forma simplificada (Equação 3.15), por meio do programa STATISTICA 6.0.

#### 3.5.2. Tempo de meio resfriamento

O tempo de meio resfriamento foi determinado de duas formas:

Obtido diretamente da curva de resfriamento para um valor da taxa adimensional de temperatura igual a 0,5 (Figura 3.8), que é quando o gradiente inicial de temperatura é reduzido pela metade (TERUEL et al., 2001).

A outra determinação foi realizada com a equação apresentada por MOHSENIN (1980), que relaciona o tempo de meio resfriamento com o fator de atraso e a taxa de resfriamento (Equação 3.20).

$$z_{1/2} = \frac{\ln(2J')}{C} \quad (3.20)$$

em que:

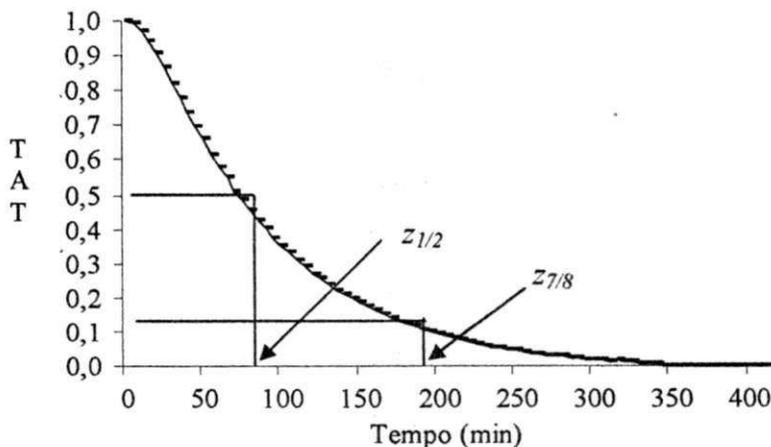
$z_{1/2}$  - tempo de meio resfriamento, s;

$J'$  - fator de atraso, adimensional;

$C$  - taxa de resfriamento,  $s^{-1}$ ;

Fez-se a comparação entre os valores obtidos pelos dois métodos calculando-se o desvio médio (Equação 3.19).

A partir da curva de resfriamento foi estimado o tempo dos sete-oitavos do resfriamento,  $z_{7/8}$  (Figura 3.8), no ponto em que a taxa adimensional de temperatura ( $TAT$ ) é igual a 0,125 (TERUEL et al., 2003).



**Figura 3.8.** Estimação gráfica do tempo de meio resfriamento,  $z_{1/2}$ , e dos sete oitavos do resfriamento,  $z_{7/8}$ .

O tempo dos sete-oitavos do resfriamento também foi calculado em função do fator de atraso,  $J'$  e da taxa de resfriamento,  $C$  (Equação 3.21).

$$z_{1/2} = \frac{\ln(8J')}{C} \quad (3.21)$$

Os valores obtidos para este parâmetro foram comparados por meio do desvio médio (Equação 3.19).

### 3.5.3. Fator de atraso

O fator de atraso,  $J'$ , foi obtido na regressão dos dados experimentais, a partir da solução da Equação de Fourier na forma simplificada (Equação 3.15), utilizando o programa STATISTICA 6.0. Este parâmetro também foi obtido diretamente na curva de resfriamento, a partir da interseção da secção reta da curva no eixo das ordenadas.

Os valores de  $J'$ , obtidos na regressão dos dados, foram utilizados para o cálculo da raiz da Equação de Fourier,  $\mu_1$ , por meio do programa *Microsoft Excel*, com a ferramenta "Atingir meta" (Equação 3.17).

### 3.5.4. Difusividade térmica

A difusividade térmica foi determinada em função da taxa de resfriamento e da raiz da Equação de Fourier, obtidos na regressão dos dados experimentais, e do raio equivalente do produto (Equação 3.22).

$$\alpha = \frac{CR_c^2}{\mu_1^2} \quad (3.22)$$

A difusividade térmica também foi determinada utilizando o modelo de Martens, citado por SIMÕES (1997), apresentado na Equação 3.23.

$$\alpha = [(0,057363X_w + 0,000288(T + 273))]10^{-6} \quad (3.23)$$

em que:

$\alpha$  - difusividade térmica do produto,  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ;

$X_w$  - conteúdo de água, decimal;

$T$  - temperatura,  $^{\circ}\text{C}$ .

### 3.5.5. Condutividade térmica

A condutividade térmica foi calculada a partir da difusividade térmica, do calor específico e da massa específica do produto (Equação 3.24), de acordo com HELDMAN (1982).

$$k = \alpha \rho c_p \quad (3.24)$$

em que:

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

$\alpha$  - difusividade térmica do produto,  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ;

$\rho$  - massa específica do produto,  $\text{kg m}^{-3}$ ;

$c_p$  - calor específico do produto,  $\text{J kg}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

O cálculo da condutividade térmica foi realizado em função dos dois valores obtidos para a difusividade térmica em cada temperatura.

### 3.5.6. Coeficiente de transferência de calor

O coeficiente convectivo de transferência de calor foi calculado em função da condutividade térmica, do raio equivalente do produto e do número de Biot (Equação 3.25), de acordo com BECKER & FRICKE (2004).

$$h = \frac{kB_i}{R_e} \quad (3.25)$$

em que:

$h$  - coeficiente convectivo de transferência de calor,  $\text{W m}^{-2} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

$k$  - condutividade térmica,  $\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

$B_i$  - número de Biot;

$R_e$  - raio equivalente do produto, m.

O número de Biot, usado no cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor, foi calculado em função da raiz da Equação de Fourier (Equação 3.26), como descrito por BECKER & FRICKE (2004).

$$B_i = 1 - \frac{\mu_n}{\text{tg}\mu_n} \quad (3.26)$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Medidas físicas

#### 4.1.1. Dimensões

Nas Tabelas 4.1 e 1A (Anexo A) estão apresentados os valores médios do diâmetro maior, diâmetro intermediário, diâmetro menor, da espessura máxima da polpa, do raio equivalente e da distância  $r$ , para a manga variedade Tommy Atkins.

Tabela 4.1. Dimensões médias da manga variedade Tommy Atkins.

Dimensão característica	Valor médio (mm)	DP (mm)	CV (%)
Diâmetro maior	108,94	3,09	2,84
Diâmetro intermediário	95,51	1,84	1,92
Diâmetro menor.	86,70	1,73	2,00
$E_p$	37,60	1,30	3,45
$R_e$	48,31	0,71	1,47
$r$	10,71	-	-

DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

Observa-se na Tabela 4.1 que a variação entre os valores medidos em cada dimensão em relação à respectiva média é consideravelmente pequena, com variação menor que 3,10 mm. O diâmetro maior médio é  $108,94 \pm 3,09$  mm ( $10,89 \pm 0,30$  cm). Este valor está próximo do comprimento máximo da manga variedade Tommy Atkins apresentado por PINTO et al. (2000), que foi 13,0 cm. Verifica-se ainda que o valor médio para a espessura máxima é  $37,60 \pm 1,30$  mm; o raio equivalente médio é igual a  $48,31 \pm 0,71$  mm, e a distância  $r$  é 10,71 mm. Comparando-se a espessura média obtida com o valor de  $r$ , constata-se que a espessura da semente do fruto estudado é relativamente pequena em relação à da polpa.

#### 4.1.2. Massa

A massa média é  $509,19 \pm 23,15$  g (Anexo A, Tabela 2A). Este valor médio está dentro da faixa apresentada por BLEINROTH (1994) para frutos de manga destinados à exportação, que é de 250,0 a 750,0 g para a Europa, e de 250,0 a 650,0 g para os Estados Unidos da América.

A pequena variação da massa observada entre os frutos indica que as frutas estudadas tinham características adequadas para exportação, visto que, de acordo com FILGUEIRAS et al. (2000b), as normas internacionais de exportação estabelecem limites de tolerância para as diferenças de massa entre as frutas de uma mesma embalagem. Estes limites variam de acordo com a massa e a quantidade de frutas da embalagem.

#### 4.1.3. Volume

O volume médio é  $516,31 \pm 21,95$  cm<sup>3</sup> (Anexo A, Tabela 3A). Constata-se, pela pequena variação de volume, que as frutas foram bem selecionadas, apresentando um tamanho padronizado.

#### 4.1.4. Massa específica

O valor médio da massa específica é  $1,01 \pm 0,01$  g cm<sup>-3</sup> (Anexo A, Tabela 4A). Este valor está dentro da faixa apresentada por BLEINROTH (1994) e por CUNHA & SAMPAIO (2000), para a manga no ponto de maturação de colheita, que é de 1,01 a 1,02 g cm<sup>-3</sup>.

Observa-se ainda que o valor obtido está bem próximo da massa específica da água, que é de 1,00 g cm<sup>-3</sup>, o que está relacionado a grande quantidade de água existente no fruto, no ponto de maturação estudado.

#### 4.1.5. Conteúdo de água

O conteúdo de água médio é  $85,24 \pm 0,84\%$  (Anexo A, Tabela 5A). O valor médio obtido é semelhante ao encontrado por SIMÕES (1997), que foi de 87,03%, para a polpa de manga integral, variedade Tommy Atkins, e está relativamente próximo da

faixa de valores encontrada por GUIMARÃES (2000) para a polpa de manga de mesma variedade, armazenada em períodos de 45, 90, 135 e 180 dias, que foi de 80,47, 82,11, 80,87 e 82,01%, respectivamente. Também se aproxima do apresentado por ASHRAE (1994), que foi de 81,00%.

#### 4.1.6. Circularidade

O valor médio da circularidade é  $79,13 \pm 3,32\%$  (Anexo A, Tabela 6A), o que indica que os frutos estudados possuíam uma boa uniformidade física (QUEIROZ, 1994).

De acordo com o valor médio obtido pode-se dizer que as frutas apresentavam um formato aproximadamente esférico, que é quando a circularidade está próxima de 90,00% (SILVA, 2002).

#### 4.1.7. Esfericidade

A esfericidade média é  $80,64 \pm 3,82\%$  (Anexo A, Tabela 7A), que confirma a forma esférica aproximada e uniformidade física bem definida das frutas, como foi observado na análise da circularidade.

O valor encontrado para a esfericidade indica que as frutas possuem um alto índice de rolagem, o que é favorável em processos de seleção, favorecendo também a circulação do ar no interior de embalagens, visto que, o formato esférico permite maior distribuição de espaços vazios definidos no interior da massa armazenada (QUEIROZ, 1994).

#### 4.1.8. Índice de firmeza

O valor médio obtido para o índice de firmeza é  $3,18 \pm 0,78 \text{ kg cm}^{-2}$  (Anexo A, Tabela 8A). O coeficiente de variação obtido (Tabela 4.2) indica uma limitação na determinação desta característica física com o uso do penetrômetro.

Este valor é maior que os apresentados por CUNHA & SAMPAIO (2000) que foi de 1,75 a 2,00  $\text{kg cm}^{-2}$ , para a manga no ponto ótimo de colheita, e menor que os apresentados por BLEINROTH (1994), que foram de 11,00 a 13,00  $\text{kg cm}^{-2}$ , para o índice de firmeza da fruta no início da colheita. Observa-se que o valor determinado

neste trabalho está entre as faixas citadas na literatura, o que indica um estágio de maturação intermediário das frutas, entre o início da colheita, que é feita com o fruto de vez, e o ponto ótimo de colheita, em que a fruta já está madura.

#### 4.1.9. Calor específico

O valor médio do calor específico é  $4,34 \pm 0,46 \text{ kJ kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$  (Anexo A, Tabela 9A). Este valor está relativamente próximo do determinado por SIMÕES (1997) para a polpa integral de manga, variedade Tommy Atkins, que foi de  $3,95 \text{ kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ , e bem próximo do calor específico da água pura que é  $4,184 \text{ kJ kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$ , o que deve estar associado ao alto conteúdo de água do produto estudado. Porém diverge do apresentado por ASHRAE (1994), que foi de  $3,55 \text{ kJ kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$ .

#### 4.1.10. Cinzas

O valor médio das cinzas é  $0,324 \pm 0,03\%$  (Anexo A, Tabela 10A). Este valor está próximo do apresentado por SIMÕES (1997) que encontrou um valor de 0,276% para as cinzas da polpa integral de manga variedade Tommy Atkins. Entretanto, diverge dos valores determinados por GUIMARÃES (2000) que obteve 0,43, 0,42, 0,45 e 0,39% para as cinzas da polpa de manga de mesma variedade, armazenada nos períodos de 45, 90, 135 e 180 dias, respectivamente.

#### 4.1.11. Resumo das características físicas

Os valores médios com o desvio padrão e o coeficiente de variação de todas as medidas físicas obtidas para manga variedade Tommy Atkins estão apresentados em resumo na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Caracterização física da manga variedade Tommy Atkins.

Característica	Valor	Unidade	CV (%)
Diâmetro maior	108,94 ± 3,09	mm	2,84
Diâmetro intermediário	95,51 ± 1,84	mm	1,92
Diâmetro menor	86,70 ± 1,73	mm	2,00
Massa	509,19 ± 23,15	g	4,55
Volume	516,31 ± 21,95	cm <sup>3</sup>	4,25
Massa específica	1,01 ± 0,01	g cm <sup>-3</sup>	0,89
Conteúdo de água	85,24 ± 0,84	%	0,98
Circularidade	79,13 ± 3,32	%	4,20
Esfericidade	80,64 ± 3,82	%	4,74
Resistência	3,18 ± 0,78	kg cm <sup>-2</sup>	24,62
Calor específico	4,34 ± 0,46	kJ kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>	10,62
Cinzas	0,324 ± 0,03	%	8,08

CV - coeficiente de variação.

De acordo com as características físicas determinadas, apresentadas na Tabela 4.2, e comparadas com os valores da literatura, as frutas encontravam-se em um estágio de maturação adequado para o consumo, comercialização e resfriamento, visto que, não se apresentavam completamente maduras.

Comprovou-se que os frutos possuíam um formato aproximadamente esférico com um desvio médio pequeno, o que indica uma redução dos erros nos cálculos de transferência de calor quando resolvida a Equação de Fourier em coordenadas esféricas.

#### 4.2. Cinética de resfriamento da manga

Os dados experimentais e calculados da temperatura e da taxa adimensional de temperatura em função do tempo de resfriamento, para as seis temperaturas de resfriamento, encontram-se dispostos no Anexo B, nas Tabelas 1B a 6B, respectivamente.

As temperaturas iniciais médias ( $T_{im}$ ) das frutas utilizadas no experimento, para as seis temperaturas, estão apresentadas na Tabela 4.3.

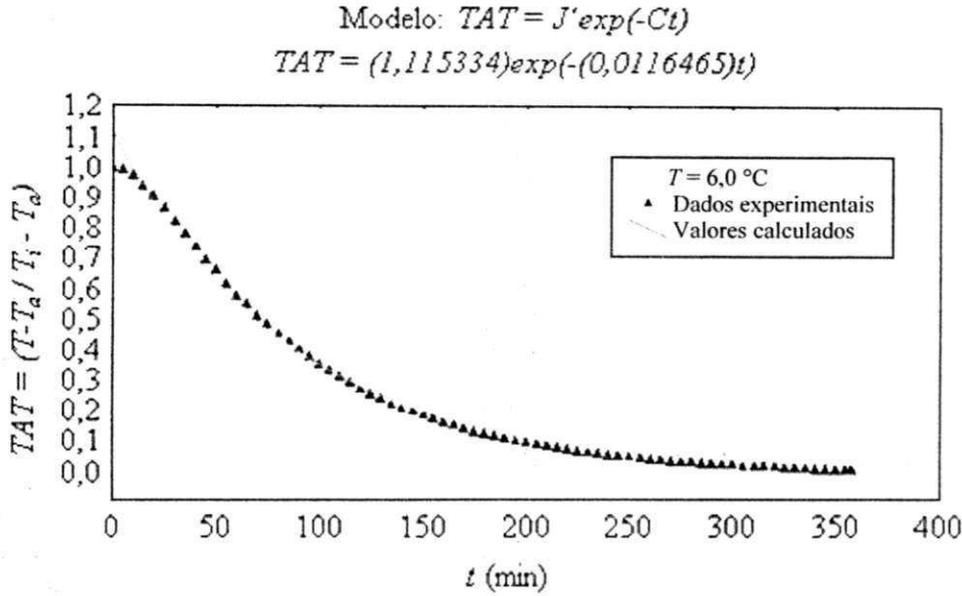
**Tabela 4.3.** Temperatura inicial média dos frutos nas seis temperaturas.

Temperatura (°C)	$T_{im}$ (°C)	CV (%)
6,0	26,50 ± 0,31	1,15
<b>8,0</b>	26,60 ± 1,47	5,54
10,0	25,50 ± 1,42	5,59
12,0	25,40 ± 0,27	1,04
14,0	25,40 ± 1,31	5,13
16,0	26,70 ± 0,15	0,57
Média	26,02 ± 0,82	-
<b>DP</b>	0,64	-
<b>CV (%)</b>	2,47	-

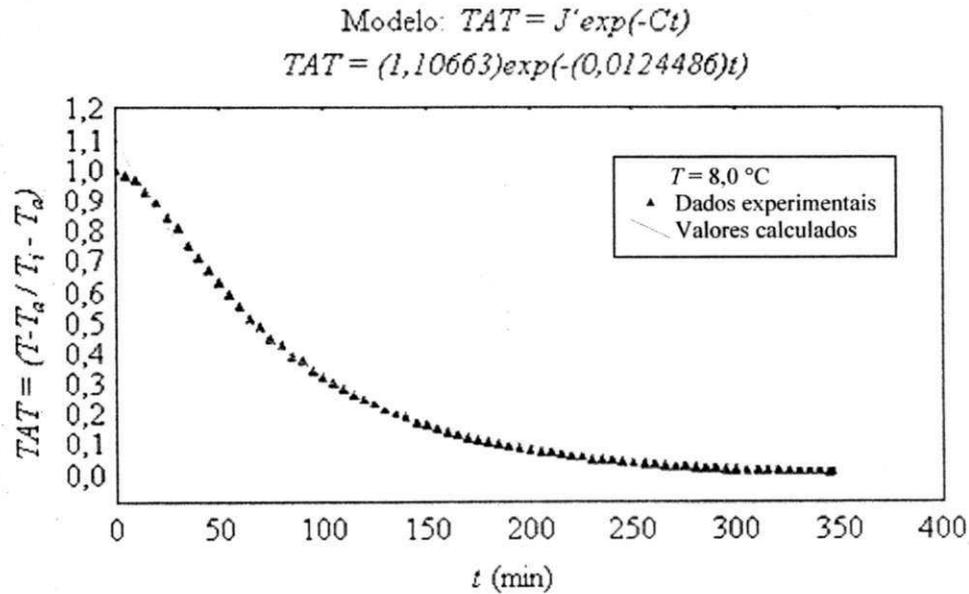
DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

Observa-se na Tabela 4.3 que as temperaturas iniciais médias dos frutos variam 0,64 °C em relação à média, que é 26,02 ± 0,82 °C. Esta variação pode influenciar diretamente nos tempos de resfriamento dos frutos (QUEIROZ, 1994).

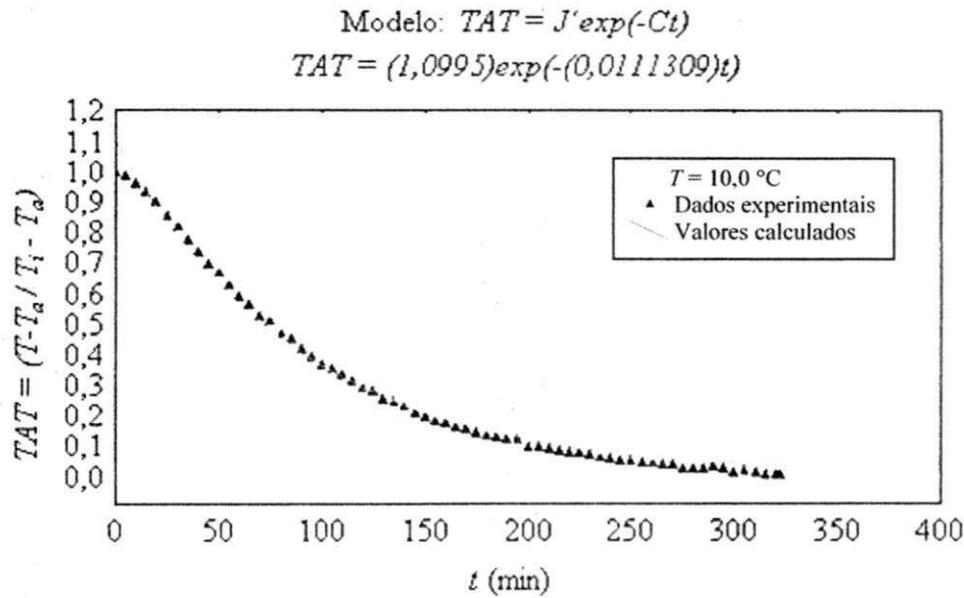
Nas Figuras 4.1 a 4.6 são apresentadas as curvas médias de resfriamento da manga variedade Tommy Atkins, para as temperaturas de 6,0 a 16,0 °C, respectivamente.



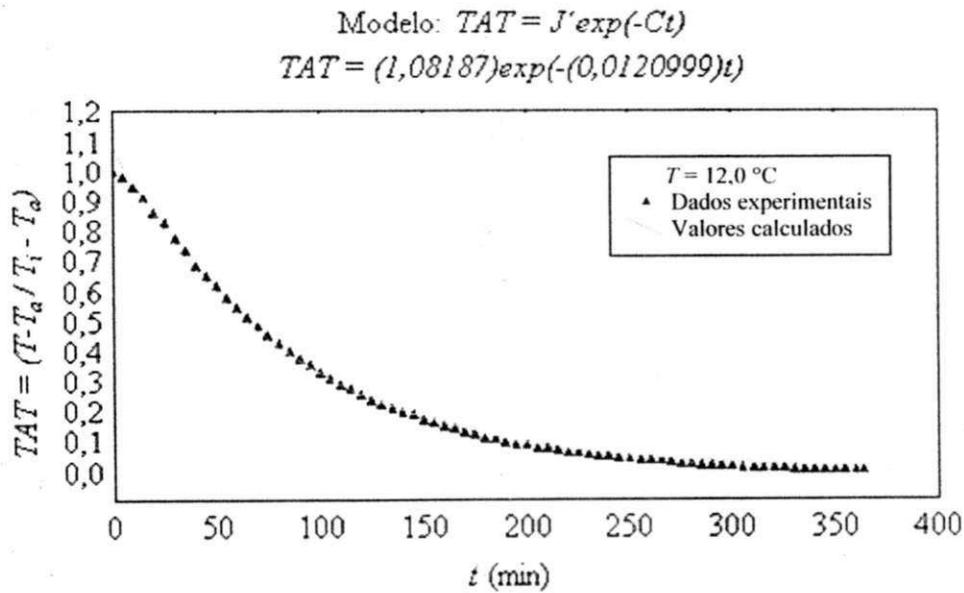
**Figura 4.1.** Curva de resfriamento da manga variedade Tommy Atkins resfriada a  $6,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ .



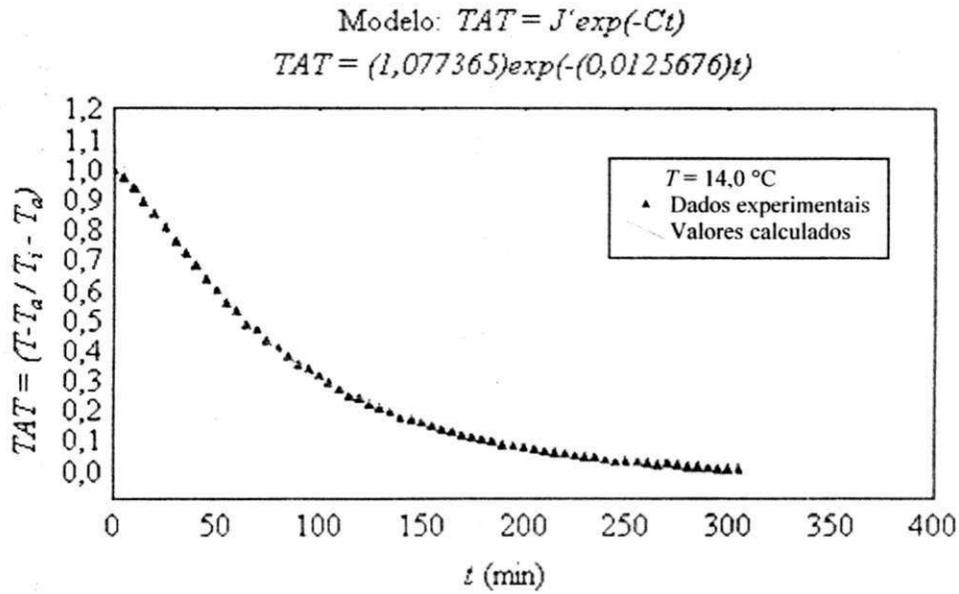
**Figura 4.2.** Curva de resfriamento da manga variedade Tommy Atkins resfriada a  $8,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ .



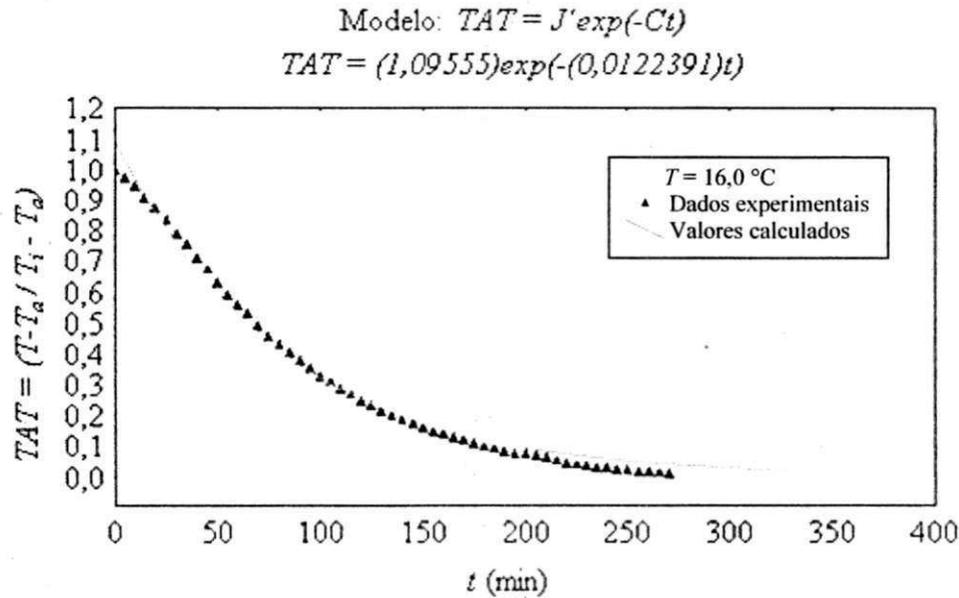
**Figura 4.3.** Curva de resfriamento da manga variedade Tommy Atkins resfriada a  $10,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ .



**Figura 4.4.** Curva de resfriamento da manga variedade Tommy Atkins resfriada a  $12,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ .



**Figura 4.5.** Curva de resfriamento da manga variedade Tommy Atkins resfriada a  $14,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ .



**Figura 4.6.** Curva de resfriamento da manga variedade Tommy Atkins resfriada a  $16,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Os valores do coeficiente de determinação e do desvio médio relativo, obtidos nos ajustes da Equação de Fourier nas seis temperaturas, são apresentados na Tabela 4.4.

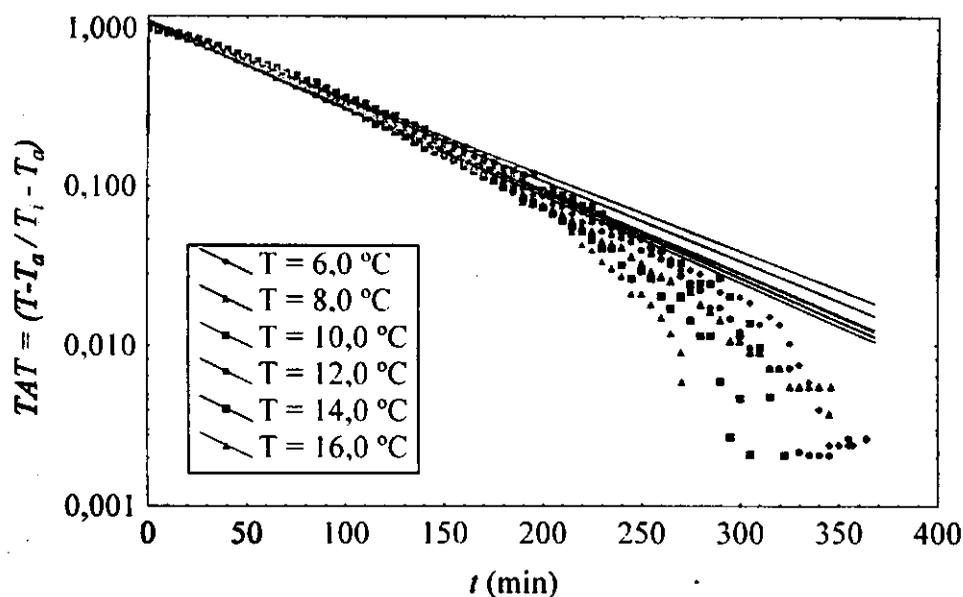
**Tabela 4.4.** Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e desvio médio relativo ( $P$ ).

Temperatura (°C)	$R^2$ (%)	$P$ (%)
6,0	99,42	5,20
8,0	99,43	5,28
10,0	99,34	5,01
12,0	99,65	3,72
14,0	99,57	3,90
16,0	99,12	5,84

Analisando-se os dados da Tabela 4.4, observa-se um coeficiente de determinação maior que 99,0% e um erro médio relativo inferior a 5,9% em todas as temperaturas da faixa estudada, o que indica um ajuste significativo da Equação de Fourier aos dados experimentais. O melhor ajuste ocorre para a temperatura 12,0 °C, em que se verifica o maior coeficiente de determinação, 99,65%, e o menor desvio médio relativo, 3,72%. O segundo melhor ajuste é obtido para a temperatura 14,0 °C, em que o coeficiente de determinação é igual a 99,57%, e o desvio médio relativo 3,90%.

De acordo com os resultados encontrados para o coeficiente de determinação e para o desvio médio relativo, que são os critérios usados na literatura na avaliação do ajuste de modelos matemáticos, e considerando as condições de realização deste trabalho, constata-se que a solução da Equação de Fourier em coordenadas esféricas pode ser utilizada com precisão para representar a cinética de resfriamento da manga variedade Tommy Atkins, na faixa de temperatura considerada, principalmente para as temperaturas de 12,0 e 14,0 °C.

Uma representação das seis curvas médias de resfriamento linearizadas em um único sistema de eixos, com o eixo das ordenadas em escala logarítmica, é apresentada na Figura 4.7.



**Figura 4.7.** Curvas de resfriamento linearizadas nas seis temperaturas.

Em uma análise detalhada da Figura 4.7, identifica-se uma aproximação acentuada das retas, sendo que as maiores inclinações não correspondem as menores temperaturas, o que indica a proximidade da taxa de resfriamento dentro da faixa de 6,0 a 16,0 °C sobre este comportamento.

Estudando o resfriamento de umbu em um sistema de resfriamento com circulação forçada de ar a  $2,8\text{ m s}^{-1}$ , QUEIROZ (1994) verificou um comportamento das curvas médias de resfriamento bem semelhante a este, para uma faixa de temperatura de  $-9,8$  a  $-20,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a intervalos em torno de  $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , concluindo que esta faixa era suficientemente pequena para acarretar influência nos tempos de resfriamento.

Verifica-se ainda na Figura 4.7 uma proximidade das curvas entre uma determinada temperatura e a posterior ou anterior, chegando, algumas delas, a se interceptar entre si. Esse comportamento pode ter sido decorrente da variação de temperatura no interior da câmara durante o resfriamento, visto que o intervalo entre temperaturas é de  $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e a temperatura do equipamento utilizado oscilava, em média, em torno de  $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  para mais ou para menos.

Com base na discussão referente ao comportamento das curvas de resfriamento, constata-se que há, possivelmente, uma variação relativamente pequena da taxa de resfriamento na faixa de temperatura estudada, o que pode explicar, fisicamente, a resposta obtida nas curvas, principalmente com relação à aproximação destas, sendo que esta hipótese poderá ser avaliada de forma mais coerente e com maior confiança na análise dos parâmetros físicos envolvidos na transferência de calor no resfriamento, principalmente, por meio dos valores obtidos, a partir dos dados experimentais, para a taxa de resfriamento, difusividade e condutividade térmica, e para os tempos de resfriamento.

Uma outra hipótese que pode ser levantada é que este comportamento pode ser resultante das características do sistema de resfriamento utilizado, visto que as câmaras convencionais de refrigeração são caracterizadas por apresentar uma baixa taxa de resfriamento e, conseqüentemente, um alto tempo de resfriamento, não sendo indicada em alguns casos, dependendo do produto considerado, para o resfriamento do produto, mas apenas para o armazenamento deste.

Em sua pesquisa sobre o resfriamento de laranja em três diferentes sistemas de resfriamento, que foram resfriamento por imersão em água, sistema com ar forçado e em câmara convencional, TERUEL et al. (2001) verificaram que os tempos de resfriamento no sistema de câmara convencional foram oito vezes maiores que no sistema por imersão em água e três vezes maiores que no sistema com circulação de ar, concluindo que o sistema de câmara convencional deve ser utilizado apenas para o armazenamento da fruta estudada, após esta ser resfriada em um dos outros sistemas estudados.

Outra hipótese que também deve ser considerada refere-se à transferência de calor por convecção na superfície do produto que é muito baixa nos sistemas de resfriamento a ar sem circulação forçada, que é o caso do utilizado neste trabalho. Nestes sistemas, a troca de calor do produto com o meio no qual se encontra inserido ocorre a uma taxa lenta e que pode não apresentar variação significativamente diferenciada, em alguns casos, em que a faixa de temperatura é relativamente pequena, influenciando na velocidade com que ocorre o resfriamento e, por conseqüência, no comportamento das curvas ao longo do tempo de resfriamento dentro desta faixa. Entretanto, a avaliação do coeficiente de transferência de calor será discutida posteriormente, sendo possível a observação do comportamento ou variação dos valores

para as temperaturas estudadas, e com isso, uma análise mais precisa desta hipótese levantada.

Contudo, a partir das discussões anteriores, recomenda-se o estudo do resfriamento da manga variedade Tommy Atkins para as mesmas temperaturas, em outros tipos de câmaras convencionais, bem como em outros sistemas de resfriamento, para se ter uma maior segurança em afirmar se é aconselhável e viável, ou não, economicamente e em termos de eficiência de resfriamento, o uso deste sistema no resfriamento da fruta, tendo em vista que este trabalho propõe o estudo da cinética de resfriamento e avaliação dos parâmetros físicos envolvidos no processo de resfriamento, não sendo proposto, portanto, a comparação e avaliação do sistema de resfriamento estudado.

### 4.3. Parâmetros físicos de transferência de calor no resfriamento

#### 4.3.1. Taxa de resfriamento

Os valores obtidos para a taxa de resfriamento nas seis temperaturas são apresentados na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5.** Taxa de resfriamento em função da temperatura.

Temperatura (°C)	C (min <sup>-1</sup> )	CV (%)
6,0	0,0116 ± 0,0001	0,92
8,0	0,0124 ± 0,0003	2,66
10,0	0,0112 ± 0,0007	6,19
12,0	0,0121 ± 0,0007	5,45
14,0	0,0125 ± 0,0001	0,83
16,0	0,0123 ± 0,0005	4,30
Média	0,0120 ± 0,0004	-
DP	0,0005	-
CV (%)	4,37	-

DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

Verifica-se que a variação dos valores relativa à média é 0,0005 min<sup>-1</sup> e que não há uma relação direta entre a taxa de resfriamento e a temperatura dentro da faixa de temperatura estudada quando o resfriamento é realizado até o produto atingir a temperatura da câmara. Resultados semelhantes para a taxa de resfriamento foram obtidos por SPAGNOL (1989), estudando o resfriamento de manga, e por QUEIROZ (1994), no resfriamento de umbu.

QUEIROZ et al. (1997) verificaram que a taxa de resfriamento não sofreu influência mensurável da temperatura, para a faixa de temperatura estudada.

### 4.3.2. Tempos de resfriamento

#### 4.3.2.1. Tempo de meio resfriamento

Os resultados dos tempos de meio resfriamento obtidos nas curvas de resfriamento ( $z_{1(1/2)}$ ) e os calculados ( $z_{2(1/2)}$ ) para as seis temperaturas estudadas, bem como o erro relativo médio entre as determinações, estão na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6.** Tempo de meio resfriamento em função da temperatura.

Temperatura (°C)	$z_{1(1/2)}$ (min)	$z_{2(1/2)}$ (min)	P (%)
6,0	68,67 ± 1,15	69,00 ± 1,15	0,48
8,0	63,67 ± 2,31	63,89 ± 2,31	0,35
10,0	71,00 ± 6,00	70,89 ± 6,00	0,16
12,0	63,33 ± 4,16	63,90 ± 4,16	0,90
14,0	61,17 ± 0,29	61,20 ± 0,29	0,05
16,0	64,67 ± 5,03	64,13 ± 5,03	0,83
Média	65,42 ± 3,16	65,50 ± 3,34	-
DP	3,68	3,65	-
CV (%)	5,63	5,58	-

DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação;

Nota-se uma diferença inferior a 1,0 %, em cada temperatura, entre os valores obtidos nas curvas e os calculados, o que indica uma boa representatividade da equação utilizada por MOHSENIN (1980) para a determinação do tempo de meio resfriamento.

Os desvios de 3,68 e 3,65 min dos valores em relação à média, em cada determinação, indicam uma aproximação destes dentro da faixa de temperatura, demonstrando que, no ponto em que a taxa adimensional de temperatura é igual a 0,5, os períodos de tempo são semelhantes.

As variações encontradas entre os valores podem estar relacionadas às possíveis diferenças nos diâmetros, nos estádios de maturação, nos conteúdos de água e nas temperaturas iniciais médias das frutas utilizadas nos experimentos, fatores estes que influenciam no tempo de meio resfriamento.

Os valores médios obtidos são bem maiores que o encontrado por QUEIROZ et al. (1997) para o tempo de meio resfriamento do umbu, que foi de 0,13 h. Esta grande diferença observada se deve, principalmente, ao sistema de resfriamento utilizado por este autor, que resfriou os frutos em um sistema com circulação forçada de ar, e também à diferença entre os diâmetros dos frutos e temperaturas de resfriamento, em ambos os trabalhos.

#### 4.3.2.2. Tempo dos sete-oitavos do resfriamento

Na Tabela 4.7 são apresentados os valores do tempo dos sete-oitavos do resfriamento obtidos na curva de resfriamento ( $z_{1(7/8)}$ ) e os calculados ( $z_{2(7/8)}$ ) para os diferentes níveis de temperatura, bem como o erro relativo médio entre as determinações.

**Tabela 4.7.** Tempo dos sete-oitavos do resfriamento em função da temperatura.

Temperatura (°C)	$z_{1(7/8)}$ (min)	$z_{2(7/8)}$ (min)	P (%)
6,0	189,33 ± 2,31	188,42 ± 1,28	0,48
8,0	177,00 ± 6,08	175,58 ± 4,19	0,80
10,0	196,33 ± 14,19	195,44 ± 13,67	0,46
12,0	185,33 ± 6,51	178,69 ± 10,83	3,58
14,0	172,00 ± 1,73	171,95 ± 0,80	0,03
16,0	176,67 ± 10,26	177,38 ± 10,83	0,40
Média	182,78 ± 6,85	181,24 ± 6,94	-
DP	9,17	8,87	-
CV (%)	5,01	4,89	-

DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

Observa-se na Tabela 4.7 um desvio inferior a 10,0 min dos valores em relação à média e que os valores variam de 172,00 ± 1,73 a 196,33 ± 14,19 min, com valor médio igual a 182,78 ± 6,85 min.

A diferença observada em cada temperatura, entre os valores obtidos nas curvas e os calculados, é inferior a 3,60%, o que indica uma boa representação da equação utilizada na determinação deste parâmetro.

#### 4.3.2.3. Tempo de resfriamento da fruta até a temperatura de armazenamento

Analisando-se o resfriamento da fruta quando esta é resfriada em diferentes temperaturas até uma temperatura fixa, pode-se verificar uma diferença muito significativa entre os tempos de resfriamento. Uma comparação entre os tempos de resfriamento quando o produto é resfriado até 12,0 °C pode ser vista na Figura 4.8, em que se encontram as curvas experimentais médias de resfriamento para as temperaturas de 6,0 a 12,0 °C. Estes tempos foram comparados para o resfriamento até 12,0 °C por esta temperatura está dentro da faixa de armazenamento da manga citada na literatura, que está entre 10,0 e 13,0 °C, segundo FILGUEIRAS (2000b), entre 10,0 e 12,0 °C, de acordo com CHOUDHURY (1995), e de 12,0 °C, recomendada por ALVES et al. (1998).

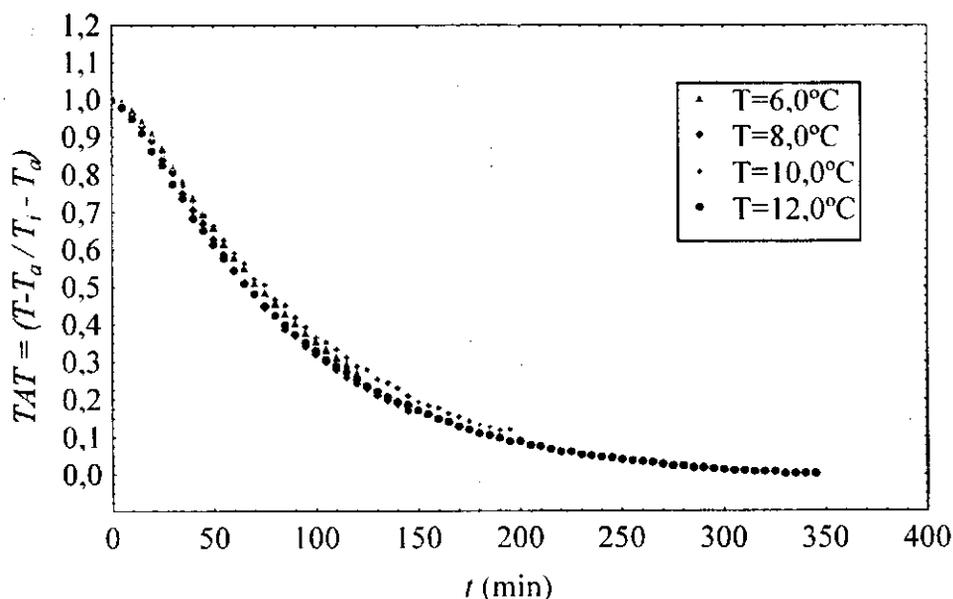


Figura 4.8. Curvas experimentais médias de resfriamento para as temperaturas de 6,0 a 12,0 °C, com o produto resfriado até 12,0 °C.

Os valores dos tempos de resfriamento obtidos na Figura 4.8 são apresentados na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8.** Tempos de resfriamento ( $z$ ) até 12,0°C em função da temperatura.

Temperatura (°C)	$z$	
	(min)	(h)
6,0	119,00	1,98
8,0	145,00	2,42
10,0	200,00	3,33
12,0	345,00	5,75

Analisando a Tabela 4.8 e a Figura 4.8, verifica-se que os tempos de resfriamento diminuem significativamente com a redução de temperatura quando o produto é resfriado até 12,0 °C.

Com este resultado, pode-se dizer, dentro das condições em que foi realizado este trabalho, que a temperatura mais indicada para o resfriamento da manga variedade Tommy Atkins até 12,0 °C é 6,0 °C, por realizar o resfriamento da fruta em menor tempo e com menor gasto de energia que as demais temperaturas, visto que, quanto menor o tempo de resfriamento, menor o custo energético.

#### 4.3.3. Difusividade térmica

Na Tabela 4.9 são apresentados os resultados encontrados para a difusividade térmica nas seis temperaturas estudadas, sendo  $\alpha_1$  a difusividade obtida a partir dos parâmetros de resfriamento e  $\alpha_2$  a difusividade calculada com modelo proposto por Martens, citado por SIMÕES (1997).

Nota-se uma pequena variação entre os valores encontrados e suas respectivas médias, o que indica que praticamente não há variação da difusividade térmica com a temperatura para a faixa em estudo.

O desvio médio relativo entre as determinações indica uma boa representação do modelo utilizado, exceto para a temperatura igual a 10,0 °C, em que o erro é 10,31%. As diferenças observadas entre os dois valores obtidos em cada temperatura devem estar relacionadas ao conteúdo de água das frutas, pelo fato do modelo de Martens ter sido

usado para um conteúdo de água médio igual a 85,24%, obtido neste trabalho, enquanto que, na determinação da difusividade térmica a partir dos parâmetros do resfriamento, as frutas, utilizadas em cada temperatura, possivelmente encontravam-se com conteúdos de água diferentes desta média.

**Tabela 4.9.** Difusividade térmica em função da temperatura.

Temperatura (°C)	$\alpha_1$ ( $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ )	$\alpha_2$ ( $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ )	$P$ (%)
6,0	1,3107	1,2925	1,39
8,0	1,3560	1,2982	4,26
10,0	1,1821	1,3040	10,31
12,0	1,2005	1,3098	9,10
14,0	1,2163	1,3155	8,16
16,0	1,2802	1,3213	3,21
Média	1,2576	1,3069	-
DP	$6,88 \cdot 10^{-9}$	$1,08 \cdot 10^{-9}$	-
CV (%)	5,47	0,83	-

DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

Observa-se também uma pequena tendência de aumento da difusividade térmica calculada por meio do modelo Martens com a temperatura, não ocorrendo o mesmo com os valores obtidos a partir dos dados de resfriamento. Alguns autores obtiveram resultados estes comportamentos para diferentes produtos agrícolas. TELIS-ROMERO et al. (1998) verificaram um aumento da difusividade térmica do suco de laranja com o aumento da temperatura para um mesmo conteúdo de água, enquanto que ARAÚJO (2000), estudando as alterações físico-químicas da acerola durante o congelamento, e FERREIRA (2000), ao estudar o efeito do congelamento sobre as características físico-químicas da polpa de umbu, não observaram relação direta da difusividade térmica com a temperatura durante a fase de resfriamento.

Os valores médios obtidos estão próximos dos encontrados por SIMÕES (1997) utilizando o método experimental do cilindro infinito e o modelo de Martens, obtendo  $1,41 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  e  $1,40 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente, para a polpa integral de manga variedade Tommy Atkins.

#### 4.3.4. Condutividade térmica

Os valores calculados para a condutividade térmica nas seis temperaturas são apresentados na Tabela 4.10, em que  $k_1$  e  $k_2$  foram obtidos a partir de  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , respectivamente.

**Tabela 4.10.** Condutividade térmica em função da temperatura.

Temperatura (°C)	$k_1$ (W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	$k_2$ (W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	$P$ (%)
6,0	0,5737	0,5657	1,39
8,0	0,5935	0,5682	4,26
10,0	0,5174	0,5707	10,31
12,0	0,5254	0,5732	9,10
14,0	0,5323	0,5758	8,16
16,0	0,5603	0,5783	3,21
Média	0,5504	0,5720	-
DP	0,0301	0,0047	-
CV (%)	5,47	0,83	-

DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

Verifica-se nesta tabela um comportamento semelhante da condutividade térmica ao encontrado para os valores de difusividade térmica, no que se refere à relação destes com a temperatura, com a variação entre os valores e as respectivas médias, e ao desvio médio relativo em cada temperatura. Um pequeno aumento dos valores de  $k_2$  com a temperatura é observado, comportamento este também verificado por TELIS-ROMERO et al. (1998) que constataram um aumento da condutividade térmica do suco de laranja com o aumento da temperatura, para uma faixa de temperatura de 0,5 a 62,0 °C.

Com relação aos valores médios obtidos, nota-se uma semelhança destes com os encontrados na literatura, aproximando-se muito do determinado em SIMÕES (1997), que encontrou um valor igual a 0,5800 W m<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup> para a condutividade térmica da polpa integral da manga de mesma variedade, e em OLIVEIRA et al. (2001), que obtiveram 0,5650 W m<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup> para a condutividade térmica do suco de laranja.

Entretanto, são maiores que os obtidos por SILVA (2002) para o fruto cajá, que obteve valores entre 0,4060 e 0,4350 W m<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>.

#### 4.3.5. Fator de atraso

Na Tabela 4.11 apresentam-se os valores do fator de atraso obtidos na regressão dos dados experimentais,  $J_1'$ , e os obtidos diretamente da curva de resfriamento,  $J_2'$ , em cada temperatura, com o desvio médio relativo entre as leituras.

Tabela 4.11. Fator de atraso em função da temperatura.

Temperatura (°C)	$J_1'$	$J_2'$	$P$ (%)
6,0	1,1139	1,1023	1,05
8,0	1,1056	1,0907	1,37
10,0	1,0999	1,0970	0,26
12,0	1,0814	1,0760	0,50
14,0	1,0757	1,0750	0,07
16,0	1,0956	1,0930	0,23
Média	1,0953	1,0890	-
DP	0,0145	0,0112	-
CV (%)	1,32	1,03	-

DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

Analisando-se a Tabela 4.11, percebe-se uma tendência de redução do fator de atraso com o aumento da temperatura, sendo que todos os valores estão acima de 1,0. Este resultado está de acordo com o conceito do fator de atraso, que deve ser superior a 1,0, e que representa o tempo necessário para que o resfriamento ultrapasse o ciclo logarítmico ou o tempo necessário para que ocorra uma redução de 90,0% da temperatura na parte reta da curva de resfriamento (MOHSENIN, 1980).

De acordo com o desvio médio encontrado pode-se observar uma diferença bastante pequena entre os valores determinados e suas médias, com desvio padrão inferior a 0,0150, e também um desvio médio entre as determinações menor que 1,40 %, em cada temperatura.

Os valores médios estão relativamente próximos do obtido por QUEIROZ et al. (1997), que encontraram um valor igual 1,3 para o fator de atraso, ao estudar as propriedades térmicas do umbu.

#### 4.3.6. Raiz da Equação de Fourier

Os valores da raiz da Equação de Fourier,  $\mu_I$ , obtidos para as seis temperaturas, estão na Tabela 4.12.

**Tabela 4.12.** Raiz da Equação de Fourier em função da temperatura.

Temperatura (°C)	$\mu_I$
6,0	1,8591
8,0	1,8897
10,0	1,9138
12,0	1,9800
14,0	2,0048
16,0	1,9284
Média	1,9293
DP	0,0548
CV (%)	2,84

DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

Pode-se observar que há uma tendência de crescimento deste parâmetro com a temperatura. Porém, a variação entre os valores e a média é inferior a 0,0600, sendo a média igual a 1,9293.

#### 4.3.7. Número de Biot

Os números de Biot obtidos em cada temperatura encontram-se na Tabela 4.13.

**Tabela 4.13.** Número de Biot em função da temperatura.

Temperatura (°C)	$B_i$
6,0	1,5513
8,0	1,6240
10,0	1,6835
12,0	1,8587
14,0	1,9292
16,0	1,7206
Média	1,7279
DP	0,1426
CV (%)	8,25

DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

Na Tabela 4.13 observa-se um aumento no número de Biot com a temperatura, como foi verificado para a raiz da equação de Fourier, sendo o valor médio igual a 1,7279 e a variação entre os valores e esta média menor que 0,1500. Este parâmetro corresponde à relação entre a condutividade térmica na superfície e no interior das frutas, como citado por BECKER & FRICKE (2004).

Como os valores obtidos são maiores que 0,2 ( $B_i > 0,2$ ), verifica-se que é satisfeita a condição apresentada por MOHSENIN (1980), constatando-se o acerto na utilização da Equação de Fourier no estudo do resfriamento da manga variedade Tommy Atkins e na determinação dos parâmetros de transferência de calor relacionados ao resfriamento.

#### 4.3.8. Coeficiente convectivo de transferência de calor

Na Tabela 4.14 apresentam-se os valores calculados do coeficiente convectivo de transferência de calor para os níveis de temperatura.

Não se verifica relação direta entre a temperatura e o coeficiente convectivo de transferência de calor, para a faixa de temperatura em estudo. Comportamento este, semelhante ao obtido por QUEIROZ (1994) no resfriamento do umbu.

**Tabela 4.14.** Coeficiente convectivo de transferência de calor em função da temperatura.

Temperatura (°C)	$h$ (W m <sup>-2</sup> °C <sup>-1</sup> )
6,0	18,42
8,0	19,95
10,0	18,03
12,0	20,22
14,0	21,26
16,0	19,96
Média	19,64
DP	1,20
CV (%)	6,12

DP - desvio padrão; CV - coeficiente de variação.

A variação entre os valores e a média é de 1,20 W m<sup>-2</sup> °C<sup>-1</sup>, sendo a média igual a 19,64 W m<sup>-2</sup> °C<sup>-1</sup>.

Os valores obtidos estão próximos da faixa de 20,0 a 35,0 W m<sup>-2</sup> °C<sup>-1</sup>, citada por MOHSENIN (1980) para sistemas com ar forçado com velocidades de ar entre 1,5 e 5,0 m s<sup>-1</sup>. No entanto, são muito inferiores aos apresentados por HOLMAN (1986), que apresenta valores entre 5,0 e 6,0 W m<sup>-2</sup> °C<sup>-1</sup> para sistemas de resfriamento convencional.

## 5. CONCLUSÕES

De acordo com a análise e discussão dos resultados, conclui-se que:

Características físicas:

- Os valores médios obtidos para as medidas físicas da manga variedade Tommy Atkins estão próximos dos encontrados na literatura;
- A fruta estudada apresenta um formato esférico aproximado, o que satisfaz a utilização da solução analítica da Equação de Fourier em coordenadas esféricas no estudo da cinética de resfriamento;

Cinética de resfriamento:

- A solução da Equação de Fourier em coordenadas esféricas pode ser usada com precisão para representar a cinética de resfriamento da manga variedade Tommy Atkins, na faixa de temperatura estudada, principalmente nas temperaturas de 12,0 e 14,0 °C.
- A temperatura mais indicada para o resfriamento da manga variedade Tommy Atkins em câmara convencional de refrigeração até 12,0 °C, temperatura de armazenamento da fruta, é 6,0 °C;

Parâmetros de transferência de calor:

- Os tempos de meio e dos sete-oitavos do resfriamento apresentam comportamento semelhante aos valores encontrados na literatura, e as equações usadas na determinação destes parâmetros representam de forma significativa os dados obtidos experimentalmente;

- A difusividade e a condutividade térmica não apresentam relação direta com a temperatura, apresentando pequena variação entre os valores na faixa analisada;
- O fator de atraso aumenta com a redução de temperatura, e a raiz da Equação de Fourier e o número de Biot apresentam uma tendência de aumento com a temperatura de resfriamento, na faixa de temperatura estudada;
- Os valores do coeficiente convectivo de transferência de calor são bem maiores que os encontrados na literatura para o resfriamento de produtos em câmara convencional de refrigeração, e estão próximos dos valores encontrados em sistemas com circulação de ar forçado.

### 5.1. Sugestões para trabalhos futuros

1. Estudar o resfriamento da manga Tommy Atkins em sistema com ar forçado e comparar com o sistema em câmara convencional;
2. Avaliar as alterações físicas e químicas da fruta após o resfriamento;
3. Estudar a faixa de temperatura mais adequada para o armazenamento da variedade de manga estudada;
4. Estudar a cinética de resfriamento da fruta para diferentes estádios de maturação;
5. Fazer o estudo do resfriamento para outras variedades de manga, principalmente as mais produzidas na região do semi-árido nordestino;
6. Estudar a cinética de resfriamento para a fruta armazenada em diferentes embalagens;
7. Estudar o resfriamento da fruta para grandes massas armazenadas;
8. Projetar e instalar um sistema de resfriamento com ar forçado à escala de laboratório para o desenvolvimento de pesquisas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. M. de. Armazenagem refrigerada de umbu (*Spondias tuberosa Arruda Câmara*): alterações das características físicas e químicas de diferentes estádios de maturação. Campina Grande: UFPB/CCT, 1999. 89p. Dissertação Mestrado.

ALVAREZ G.; TRYSTRAM G. Design of a new strategy for the control of the refrigeration process: fruit and vegetables conditioned in a pallet. Food Control, v. 6, n. 6, p. 347-355, 1995.

ALVES, R.M.V.; SIGRIST, J. M. M.; PADULA, M. Atmosfera modificada em mangas "Tommy Atkins". Revista Brasileira de Fruticultura, Cruz das Almas, v.20, n.2, p.220-228, 1998.

AOAC - Association of Official Analytical Chemists. Official methods of analysis. 14 ed. Arlington, Virginia, 1992.

ARAÚJO, M. S. O. de. Avaliação das características físico-químicas e sensoriais de polpa de acerola (*Malpighi emarginata D. C.*) submetidas a diferentes técnicas de congelamento. Campina Grande: UFPB/CCT, 2000. 108p. Dissertação Mestrado.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Systems and Applications. Atlanta, 1994.

BECKER, B. R.; FRICKE, B. A. Heat transfer coefficients for forced-air cooling and freezing of selected foods. International Journal of Refrigeration, v.27, n.5, p.540-551, 2004.

BLEINROTH, E. W. Seleção. In: SILVA, J. M. de M. Manga Para Exportação: Procedimento Para Colheita e Pós-colheita. 44 p. Brasília: Embrapa - SPI, 1994. cap. 2, p. 11 - 28.

BRACKMANN, A.; HUNSCHE, M.; LUNARDI, R. Efeito do atraso no início do armazenamento e do tempo de pré-esfriamento sobre a qualidade da maçã 'gala'. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.25, n.1, p.143-148, 2001.

BRUNINI, M. A.; DURIGAN, J. F.; OLIVEIRA, A. L. de; Avaliação das alterações em polpa de manga 'Tommy-Atkins' congeladas. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, v.24, n.3, p.651 - 653, 2002.

CASTRO NETO, M. T. de. Aspectos fisiológicos da mangueira sob condições irrigadas. In: MARQUES, M. E. de P.; MENEZES, E. A. *Informações Técnicas Sobre a Cultura da Manga no Semi-Árido Brasileiro*. 173p. Brasília: Embrapa - SPI, 1995. cap. 3, p. 83 - 100.

CASTRO NETO, M. T. de; CUNHA, G. A. P. da. Introdução. In: SILVA, J. M. de M. *Manga. Produção: aspectos técnicos*. 63p. Embrapa Mandioca e Fruticultura, Cruz das Almas, BA. Brasília: Embrapa Comunicação para transferência de tecnologia, 2000. cap. 1, p. 9 - 10.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; FERNANDES FILHO, J. G. Determinação da porosidade de sementes de mamona e algaroba. *Revista Nordestina de Armazenagem*, Campina Grande, v.1, n.1, p.3-31, 1984.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio. Lavras: ESAL/FAEPE, 1990, 292p.

CHOUDHURY, M. M. Colheita e manuseio pós-colheita. In: MARQUES, M. E. de P.; MENEZES, E. A. *Informações Técnicas Sobre a Cultura da Manga no Semi-Árido Brasileiro*. 173p. Brasília : Embrapa - SPI, 1995. cap. 6, p. 157 - 173.

CUNHA, G. A. P. da. Exigências edafoclimáticas. In: SILVA, J. M. de M. *Manga. Produção: aspectos técnicos*. 63p. Brasília: Embrapa Comunicação para transferência de tecnologia, 2000. cap. 13, p. 16.

CUNHA, G. A. P. da; SAMPAIO, J. M. M. Colheita. In: SILVA, J. M. de M. Manga. Produção: aspectos técnicos. 63p. Brasília: Embrapa Comunicação para transferência de tecnologia, 2000. cap. 13, p. 55 - 56.

DIAS, N. O.; VILA, M. T. R.; VIANA, A. E. Incidence and severity of mango flower malformation in six cultivars. Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, v.25, n.1, p.179-180, 2003.

FAO (2005). FAOSTAT agriculture data. Disponível: <http://faostat.fao.org/faostat/collections>. Acessado em 21 de janeiro de 2005.

FERREIRA, J. C. Efeito do congelamento ultra-rápido sobre as características físico-químicas e sensoriais de polpa de umbu (*Spondias tuberosa Arruda Câmara*) durante a armazenagem frigorificada. Campina Grande: UFPB/CCT, 2000. 112p. Dissertação Mestrado.

FERREIRA, J. C.; CAVALCANTI MATA, M. E. R.M.; BRAGA, M. E. D. Análise sensorial da polpa de umbu submetida a congelamento inicial em temperaturas criogênicas e armazenadas em câmara frigorífica. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.2, n.1, p.7-17, 2000.

FIKIIN, K. A. Generalized numerical modelling of unsteady heat transfer during cooling and freezing using an improved enthalpy method and quasi-one-dimensional formulation. International Journal of Refrigeration, v.19, n.2, p.132-140, 1996.

FILGUEIRAS, H. A. C.; AMORIM, T. B. F.; MENEZES, J. B.; ALVES, R. E. Colheita e manuseio pós-colheita. In: SILVA, J. M. de M. Manga. Pós-colheita. 40p. Brasília: Embrapa Comunicação para transferência de tecnologia, 2000b. cap. 3, p. 22 - 37.

FILGUEIRAS, H. A. C.; MENEZES, J. B.; AMORIM, T. B. F.; ALVES, R. E.; CASTRO, E. B. de. Características da fruta para exportação. In: SILVA, J. M. de M. Manga. Pós-colheita. 40p. Brasília: Embrapa Comunicação para transferência de tecnologia, 2000a. cap. 2, p. 14 -21.

GUIMARÃES, F. L. G. Avaliação das características físico-químicas e sensoriais da polpa de manga (*Mangifera indica* L.) submetida a diferentes condições de processamento e de armazenagem frigorificada. Campina Grande: UFPB/CCT, 2000. 97p. Dissertação Mestrado.

HELDMAN, D. R. Food properties drying freezing. *Food Technology*, v. 36, n. 2, p. 92-96, 1982.

HOLMAN, J. P. Heat Transfer. Toronto Mc: Hull Book Company, 1986, 95p.

IAL - Instituto Adolfo Lutz. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz - Métodos químicos e físicos para análise de alimentos. 3. ed. São Paulo, 1976. 533p.

IBARZ, A.; BARBOSA-CÁNOVAS, G.V. Operaciones Unitárias em la Ingenieria de Alimentos. Lancaster: Technomic Publishing Company, Inc., 1999. 882p.

MAROULIS, Z. B.; KROKIDA, M. K.; RAHMAN, M. S. A structural generic model to predict the effective thermal conductivity of fruits and vegetables during drying. *Journal of Food Engineering*, v.52, n.1, p.47-52, 2002.

MARTÍNEZ-ROMERO D.; CASTILLO , S.; VALERO , D. Forced-air cooling applied before fruit handling to prevent mechanical damage of plums (*Prunus salicina* Lindl.) *Postharvest Biology and Technology*, v.28, n.1, p.135-142, 2003.

MEDEIROS, B. G. de S. Propriedades físicas e químicas na determinação da maturação da goiaba (*Psidium guajava* L.) adubada. Campina Grande: UFPB/CCT, 2003. 70p. Dissertação Mestrado.

MOHSENIN, N. N. Physical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach, Science Publishers, Inc., 1978. 742p.

MOHSENIN, N.N. Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials. New York: Gordon and Breach, Science Publishers, Inc., 1980. 407p.

MORAIS, P. L. D. de; FILGUEIRAS, H. A. C.; PINHO, J. L. N. de. Harvesting maturity of mangoes 'Tommy Atkins' to thefor european market. Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, v.24, n.3, p.671-675, 2002.

NASCIMENTO, A. S. do; COUTINHO, C. de C.; FERREIRA, F. R.; SANTOS FILHO, H. P. dos; CUNHA, M. M da; JUNQUEIRA, N. T. V. 1ª. Edição. Manga - Fitossanidade. Brasília: Embrapa Comunicação para transferência de tecnologia, 2000. 104p.

NUNES, R. F. de M. Práticas culturais e implantação de pomar. In: MARQUES, M. E. de P.; MENEZES, E. A. Informações Técnicas Sobre a Cultura da Manga no Semi-Árido Brasileiro. 173p. Brasília : Embrapa - SPI, 1995. cap. 1, p. 9 - 40.

OLIVEIRA, S. D.; CAMARGO, D.; MACHADO, P. P.; BORGES, S. V. Condutividade térmica do suco de laranja. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.3, n.1, p.101-104, 2001.

PEDROSA, J. M. Y.; PIERRE, F. C. Post - harvest techniques and expansion of the mango culture in the São Paulo State - Brazil. Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, v.24, n.2, p.381-384, 2002.

PFaffenbach, L. B.; CASTRO, J. V. de; CARVALHO, C. R. L. The effect of modified atmosphere and refrigeration on post-harvest of mango red espada. Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p.410-413, 2003.

PINTO, A. C. de Q.; MATOS, A. P. de; CUNHA, G. A. P. da. Variedades (cultivares). In: SILVA, J. M. de M. Manga. Produção: aspectos técnicos. 63p. Brasília: Embrapa Comunicação para transferência de tecnologia, 2000. cap. 6, p. 19-20.

QUEIROZ, A. J. de M. Propriedades físicas e pré-resfriamento de umbu (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara). Campina Grande: UFPB/CCT, 1994. 145p. Dissertação Mestrado.

QUEIROZ, A. J. de M.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; BEZERRA, H. F.; GOMES, J. P. Propriedades termofísicas do umbu (*Spondias tuberosa Arruda Câmara*). Revista Engenharia na Agricultura, Viçosa, v.5, n.1, p. 1-14, 1997.

RAHMAN, M. S. Thermal conductivity of four food materials as a single function of porosity and water content. Journal of Food Engineering, v.15, n.4, p. 261-268, 1992.

RAHMAN, M. S.; CHEN, X. D.; PERERA, C. O. An improved thermal conductivity prediction model for fruits and vegetables as a function of temperature, water content and porosity. Journal of Food Engineering, v.31, n.2, p.163-170, 1997.

RESENDE, J. V. de; SILVEIRA Jr. V. Medidas da condutividade térmica efetiva de modelos de polpas de frutas no estado congelado - Measurements of effective thermal conductivity of fruit pulp models in the frozen state. Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v.22, n.2, p.177-183, 2002.

ROCHA, R. H. C.; MENEZES, J. B.; MORAIS, E. A. de. Use of the starch degradation index for determining maturity in mango 'Tommy Atkins'. Revista Brasileira Fruticultura, Jaboticabal, v.23, n.2, p.302-305, 2001

SILVA, M. Cinética de resfriamento e congelamento do fruto de cajá (*Spondias lutea L.*). Campina Grande: UFPB/CCT, 2002. 100p. Dissertação Mestrado.

SIMÕES, S. R. Propriedades termofísicas de polpa de manga. Campinas: UNICAMP/FEAGRI, 1997. 83p. Dissertação Mestrado.

SPAGNOL, W. A. Estudo de pré-resfriamento em manga. Campinas: UNICAMP/FEA, 1989. 193p. Dissertação Mestrado.

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, v.38, n.1, p.27-40, 1998.

TERUEL, B.; CORTEZ, L.; LEAL, P. Resfriamento de banana-prata com ar forçado - Forced-air cooling of banana. Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, v.24, n.1, p.142-146, 2002.

TERUEL, B.; CORTEZ, L.; NEVES FILHO, L. Estudo comparativo do resfriamento de laranja valência com ar forçado e com água - Comparative study of cooling orange with forced-air cooling and hydrocooling. Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v.23, n.2, p.174-178, 2003.

TERUEL, B.; CORTEZ, L.; NEVES FILHO, L. Estudo comparativo do resfriamento de laranja valência, em três sistemas de resfriamento. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e ambiental, Campina Grande, v.5, n.3, p.481-486, 2001.

TERUEL, B.; KIECKBUSCH, T.; CORTEZ, L. Cooling parameters for fruits and vegetables of different sizes in a hydrocooling system. Scientia Agricola, Piracicaba, v.61, n.6, p.655-658, 2004.

VIDAL, J.R.M.B.; GASPARETTO, C. A. Comportamento reológico da polpa de manga (*Mangifera indica L*) - Efeito dos sólidos insolúveis. Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v.20, n.2, p.172-175, 2000.

WANG, N.; BRENNAN, J. G. The influence of moisture content and temperature on the specific heat of potato measured by differential scanning calorimetry. Journal of Food Engineering, v.19, n.3, p.303-310, 1993.

## **ANEXOS**

## Anexo A

Tabela 1A. Dimensões da manga variedade Tommy Atkins.

Amostras	$D_m$ (mm)	$D_i$ (mm)	$D_{me}$ (mm)	$R_e$ (mm)	$E_p$ (mm)	Amostras	$D_m$ (mm)	$D_i$ (mm)	$D_{me}$ (mm)	$R_e$ (mm)	$E_p$ (mm)
1	106,52	96,91	87,41	34,94	48,32	26	110,57	97,35	86,71	37,16	48,86
2	110,42	95,06	87,83	35,80	48,66	27	105,26	97,40	86,25	38,93	47,99
3	101,28	94,43	88,07	36,96	47,22	28	108,33	94,13	88,08	35,40	48,24
4	111,44	93,94	85,08	35,13	48,11	29	110,89	92,13	86,33	37,90	47,95
5	105,14	93,62	83,37	37,23	46,81	30	108,30	98,56	86,46	38,07	48,68
6	101,99	92,49	87,06	35,09	46,82	31	110,02	95,51	86,97	36,54	48,52
7	100,50	93,60	88,02	36,91	46,95	32	107,70	96,02	89,38	38,29	48,71
8	112,65	93,26	88,05	37,42	48,72	33	112,66	96,07	88,08	38,49	49,21
9	108,75	97,27	85,82	35,70	48,41	34	107,54	95,50	84,49	37,14	47,69
10	108,81	91,05	85,43	37,71	47,30	35	111,81	96,88	90,22	38,25	49,62
11	111,84	95,10	86,14	37,53	48,56	36	108,71	97,26	91,32	40,12	49,42
12	103,28	95,55	87,59	37,57	47,63	37	112,47	96,08	88,09	40,15	49,19
13	111,30	94,35	87,07	37,80	48,53	38	109,47	96,54	85,06	38,35	48,26
14	104,81	94,68	86,32	41,42	47,49	39	111,21	97,08	83,40	38,22	48,28
15	105,57	93,28	86,37	37,24	47,37	40	110,88	94,28	84,00	38,58	47,88
16	105,48	93,17	84,45	39,40	46,99	41	111,59	97,50	88,91	37,14	49,45
17	111,55	94,15	88,12	38,43	48,73	42	109,80	98,36	86,32	36,37	48,84
18	107,56	96,84	85,88	36,88	48,18	43	109,73	97,07	84,04	37,92	48,19
19	111,50	93,75	86,96	38,40	48,43	44	112,18	95,38	85,83	37,19	48,60
20	112,97	92,70	86,17	37,58	48,32	45	108,53	96,13	84,32	37,89	47,91
21	107,20	97,31	86,57	36,14	48,33	46	108,52	96,61	86,68	38,79	48,43
22	108,89	99,09	88,15	37,43	49,17	47	109,84	96,77	85,79	38,45	48,49
23	109,68	94,39	86,42	38,40	48,18	48	109,34	94,99	86,26	37,28	48,20
24	108,89	98,43	85,54	38,19	48,57	49	114,31	96,37	90,82	36,29	50,01
25	107,74	94,42	87,44	38,50	48,09	50	111,48	96,73	86,05	37,15	48,77
Média							108,94	95,51	86,70	48,31	37,60
DP (mm)							3,09	1,84	1,73	0,71	1,30
CV (%)							2,84	1,92	2,00	1,47	3,45

$D_m$  - diâmetro maior;  $D_i$  - diâmetro intermediário;  $D_{me}$  - diâmetro menor;

$R_e$  - raio equivalente;  $E_p$  - espessura da polpa.

Tabela 2A. Massa da manga variedade Tommy Atkins.

Amostras	massa (g)	Amostras	massa (g)
1	545,50	26	506,00
2	531,90	27	491,78
3	505,20	28	487,94
4	526,10	29	500,70
5	462,50	30	500,20
6	463,70	31	506,60
7	464,20	32	513,70
8	526,80	33	547,50
9	502,00	34	498,10
10	466,80	35	539,20
11	539,60	36	526,70
12	493,38	37	533,90
13	529,20	38	521,00
14	468,65	39	533,11
15	475,38	40	492,30
16	483,83	41	528,30
17	534,90	42	507,90
18	542,80	43	494,44
19	530,20	44	521,10
20	500,50	45	508,10
21	504,20	46	507,20
22	530,60	47	510,70
23	492,31	48	505,30
24	504,90	49	540,90
25	490,61	50	521,00
Média			509,19
DP (g)			23,15
CV (%)			4,55

**Tabela 3A.** Volume da manga variedade Tommy Atkins.

Amostras	$V$ ( $\text{cm}^3$ )
1	521,80
2	504,30
3	491,50
4	513,80
5	500,50
6	502,30
7	506,50
8	559,80
9	549,40
10	513,20
Média	516,31
DP ( $\text{cm}^3$ )	21,95
CV (%)	4,25

**Tabela 4A.** Massa específica da manga variedade Tommy Atkins.

Amostras	$\rho$ ( $\text{g cm}^3$ )
1	1,01
2	1,01
3	1,01
4	1,01
5	1,02
6	1,01
7	1,01
8	1,01
9	0,98
10	1,02
Média	1,01
DP ( $\text{g cm}^3$ )	0,01
CV (%)	0,89

**Tabela 5A.** Conteúdo de água da manga variedade Tommy Atkins.

Amostras	$X_w$ (%)
1	85,83
2	86,05
3	85,12
4	83,95
5	84,85
6	85,35
7	85,42
8	86,72
9	84,15
10	85,01
Média	85,24
DP (%)	0,84
CV (%)	0,98

**Tabela 6A.** Circularidade da manga variedade Tommy Atkins.

Amostras	$\varphi$ (%)
1	83,64
2	78,20
3	74,55
4	83,24
5	82,84
6	77,34
7	81,09
8	76,04
9	78,21
10	76,14
Média	79,13
DP (%)	3,32
CV (%)	4,20

**Tabela 7A.** Esfericidade da manga variedade Tommy Atkins.

Amostras	<i>E</i> (%)
1	83,71
2	80,73
3	74,32
4	86,98
5	84,49
6	78,76
7	81,72
8	79,67
9	80,00
10	76,06
Média	80,64
DP (%)	3,82
CV (%)	4,74

**Tabela 8A.** Índice de firmeza da manga variedade Tommy Atkins.

Amostras	<i>R<sub>s</sub></i> (kg cm <sup>2</sup> )
1	3,65
2	2,39
3	2,52
4	3,71
5	2,79
6	2,39
7	4,44
8	4,38
9	2,32
10	3,18
Média	3,18
DP (kg cm <sup>2</sup> )	0,78
CV (%)	24,62

Tabela 9A. Calor específico da manga variedade Tommy Atkins.

Amostras	$c_p$ (kJ kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )
1	3,75
2	3,99
3	4,63
4	4,87
5	4,48
Média	4,34
DP (kJ kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	0,46
CV (%)	10,62

Tabela 10A. Cinzas da manga variedade Tommy Atkins.

Amostras	$C_z$ (%)
1	0,257
2	0,373
3	0,335
4	0,310
5	0,344
Média	0,324
DP (%)	0,030
CV (%)	8,080

## Anexo B

Tabela 1B. Dados experimentais e calculados da temperatura e da razão de temperatura em função do tempo de resfriamento a 6,0 °C.

<i>t</i> (min)	Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			<i>RT</i> Médio
	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	
0	26,4	7,1	1,0000	26,2	6,6	1,0000	26,8	6,2	1,0000	1,0000
5	26,2	6,5	0,9903	26,1	7,4	0,9951	26,7	6,5	0,9952	0,9935
10	25,7	6,8	0,9660	25,5	6,1	0,9654	26,4	6,6	0,9807	0,9707
15	25,1	7,1	0,9368	24,8	6,7	0,9308	25,9	5,9	0,9566	0,9414
20	24,3	6,1	0,8979	24,2	6,9	0,9011	25,2	6,5	0,9229	0,9073
25	23,4	6,7	0,8542	23,4	6,2	0,8615	24,5	6,6	0,8892	0,8683
30	22,5	6,8	0,8104	22,3	6,4	0,8071	23,5	6,4	0,8410	0,8195
35	21,7	5,6	0,7715	21,6	6,9	0,7725	22,6	6,1	0,7976	0,7805
40	20,8	6,2	0,7278	20,8	5,7	0,7329	21,7	6,6	0,7542	0,7383
45	20,1	6,6	0,6937	19,9	6,4	0,6884	20,7	6,3	0,7060	0,6961
50	19,2	0,3	0,6500	19,3	6,8	0,6587	20,0	5,8	0,6723	0,6603
55	18,3	5,5	0,6062	18,3	6,1	0,6093	19,2	6,3	0,6337	0,6164
60	17,7	6,3	0,5770	17,6	6,0	0,5747	18,2	6,3	0,5855	0,5791
65	17,0	6,4	0,5430	17,2	6,6	0,5549	17,6	5,5	0,5566	0,5515
70	16,3	5,4	0,5090	16,2	6,6	0,5054	16,8	5,4	0,5181	0,5108
75	15,7	6,1	0,4798	15,8	6,4	0,4856	16,2	6,3	0,4892	0,4849
80	15,1	6,4	0,4506	15,2	6,6	0,4560	15,6	6,4	0,4602	0,4556
85	14,4	6,3	0,4166	14,8	5,5	0,4362	15,0	5,3	0,4313	0,4280
90	13,9	5,5	0,3923	14,3	6,1	0,4114	14,4	5,7	0,4024	0,4021
95	13,4	6,1	0,3680	13,7	6,6	0,3818	13,9	6,3	0,3783	0,3760
100	12,9	6,4	0,3437	13,3	5,7	0,3620	13,4	6,3	0,3542	0,3533
105	12,6	5,3	0,3291	12,8	6,0	0,3373	12,9	5,3	0,3301	0,3322
110	12,1	5,4	0,3048	12,3	6,3	0,3125	12,6	6,1	0,3157	0,3110
115	11,8	6,4	0,2902	11,9	6,0	0,2927	12,2	6,1	0,2964	0,2931
120	11,4	5,9	0,2708	11,4	6,1	0,2680	11,7	5,3	0,2723	0,2704
125	11,0	5,5	0,2513	11,3	6,3	0,2631	11,3	5,4	0,2530	0,2558
130	10,7	6,3	0,2367	10,9	6,3	0,2433	11,0	6,1	0,2386	0,2395
135	10,3	6,2	0,2173	10,6	5,3	0,2285	10,6	6,2	0,2193	0,2217
140	10,1	5,3	0,2076	10,3	6,1	0,2136	10,3	5,2	0,2048	0,2087
145	9,8	5,9	0,1930	10,1	6,3	0,2037	10,1	5,8	0,1952	0,1973
150	9,6	6,3	0,1833	9,8	5,3	0,1889	9,8	6,1	0,1807	0,1843
155	9,4	5,5	0,1735	9,6	5,9	0,1790	9,6	6,1	0,1711	0,1745
160	9,2	5,6	0,1638	9,4	6,3	0,1691	9,3	5,1	0,1566	0,1632
165	8,8	5,9	0,1444	9,2	6,3	0,1592	9,2	5,9	0,1518	0,1518
170	8,7	5,8	0,1395	9,0	5,5	0,1493	8,9	6,2	0,1373	0,1421

<i>t</i> (min)	Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			<i>RT</i> Médio
	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	
175	8,5	5,2	0,1298	8,7	5,7	0,1345	8,6	5,4	0,1229	0,1291
180	8,4	6,2	0,1249	8,5	6,2	0,1246	8,5	5,6	0,1181	0,1225
185	8,3	6,2	0,1201	8,3	5,3	0,1147	8,3	6,3	0,1084	0,1144
190	8,1	6,0	0,1103	8,2	5,4	0,1098	8,2	6,4	0,1036	0,1079
195	7,8	5,3	0,0958	8,1	6,2	0,1048	8,0	6,2	0,0940	0,0982
200	7,8	6,2	0,0958	7,9	5,5	0,0949	7,9	5,7	0,0892	0,0933
205	7,7	6,2	0,0909	7,8	5,7	0,0900	7,7	6,3	0,0795	0,0868
210	7,6	5,6	0,0860	7,7	6,1	0,0850	7,7	6,3	0,0795	0,0835
215	7,3	5,2	0,0714	7,5	6,3	0,0751	7,6	5,9	0,0747	0,0738
220	7,3	6,1	0,0714	7,4	5,1	0,0702	7,4	5,7	0,0651	0,0689
225	7,2	5,1	0,0666	7,3	5,8	0,0652	7,3	6,1	0,0602	0,0640
230	7,0	5,1	0,0569	7,2	6,2	0,0603	7,3	6,4	0,0602	0,0591
235	6,9	5,2	0,0520	7,1	6,1	0,0553	7,2	6,5	0,0554	0,0543
240	6,9	5,9	0,0520	7,0	5,4	0,0504	7,1	5,9	0,0506	0,0510
245	6,8	5,3	0,0471	7,0	6,2	0,0504	7,1	5,6	0,0506	0,0494
250	6,8	5,8	0,0471	6,9	5,8	0,0455	7,0	6,2	0,0458	0,0461
255	6,7	6,2	0,0423	6,8	5,4	0,0405	7,0	6,3	0,0458	0,0429
260	6,6	5,9	0,0374	6,7	5,7	0,0356	6,9	5,7	0,0410	0,0380
265	6,6	5,8	0,0374	6,6	6,1	0,0306	6,8	5,6	0,0361	0,0347
270	6,4	5,8	0,0277	6,6	5,1	0,0306	6,7	6,2	0,0313	0,0299
275	6,4	6,2	0,0277	6,6	5,4	0,0306	6,7	5,5	0,0313	0,0299
280	6,4	6,2	0,0277	6,5	6,2	0,0257	6,7	6,2	0,0313	0,0282
285	6,3	5,5	0,0228	6,4	6,0	0,0207	6,7	6,5	0,0313	0,0250
290	6,2	5,1	0,0180	6,4	5,3	0,0207	6,6	6,3	0,0265	0,0217
295	6,2	6,1	0,0180	6,3	5,1	0,0158	6,6	5,7	0,0265	0,0201
300	6,2	5,1	0,0180	6,3	6,2	0,0158	6,6	6,2	0,0265	0,0201
305	6,2	5,4	0,0180	6,3	5,2	0,0158	6,5	6,4	0,0217	0,0185
310	6,1	6,1	0,0131	6,2	5,4	0,0108	6,4	5,5	0,0169	0,0136
315	6,1	5,8	0,0131	6,2	6,1	0,0108	6,5	6,0	0,0217	0,0152
320	6,1	5,3	0,0131	6,2	6,1	0,0108	6,4	6,3	0,0169	0,0136
325	6,0	6,2	0,0082	6,1	5,3	0,0059	6,4	6,4	0,0169	0,0103
330				6,1	5,8	0,0059	6,4	6,1	0,0169	0,0076
335				6,0	5,0	0,0009	6,4	6,0	0,0169	0,0059
340							6,3	6,4	0,0120	0,0040
345							6,2	6,3	0,0072	0,0024
350							6,2	6,2	0,0072	0,0024
355							6,2	6,0	0,0072	0,0024
360							6,2	6,5	0,0072	0,0024
365							6,2	6,2	0,0072	0,0024
370							6,2	5,7	0,0072	0,0024
375							6,1	6,2	0,0024	0,0008

<i>t</i> (min)	Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			<i>RT</i> Médio
	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	
380							6,1	6,5	0,0024	0,0008
385							6,1	6,2	0,0024	0,0008
390							6,1	5,9	0,0024	0,0008
395							6,1	6,3	0,0024	0,0008
400							6,1	6,4	0,0024	0,0008
405							6,1	5,4	0,0024	0,0008
410							6,1	6,1	0,0024	0,0008
415							6,0	6,3	-0,0024	-0,0008

*t* - tempo; *T* - temperatura no instante *t*; *T<sub>c</sub>* - temperatura da câmara; *RT* - razão de temperatura.

**Tabela 2B.** Dados experimentais e calculados da temperatura e da razão de temperatura em função do tempo de resfriamento a 8,0 °C.

<i>t</i> (min)	Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			RT Médio
	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	
0	28,3	8,9	1,0000	25,5	9,1	1,0000	26,1	8,7	1,0000	1,0000
5	28,1	8,5	0,9901	25,4	9,2	0,9943	25,3	9,1	0,9559	0,9801
10	27,6	7,9	0,9653	25,3	8,3	0,9886	24,9	8,7	0,9339	0,9626
15	26,9	8,3	0,9306	24,8	8,5	0,9603	24,2	7,8	0,8953	0,9287
20	26,2	8,4	0,8958	24,0	8,3	0,9148	23,5	7,8	0,8568	0,8891
25	25,3	8,8	0,8512	23,1	8,3	0,8638	22,5	7,8	0,8017	0,8389
30	24,4	8,2	0,8065	22,7	7,5	0,8410	21,9	7,9	0,7686	0,8054
35	23,4	7,7	0,7569	21,7	7,6	0,7843	20,8	8,1	0,7080	0,7497
40	22,6	8,2	0,7173	20,6	7,3	0,7218	20,3	7,3	0,6805	0,7065
45	21,8	8,6	0,6776	20,1	7,8	0,6934	19,6	7,7	0,6419	0,6710
50	20,8	8,7	0,6280	19,4	7,6	0,6537	18,9	8,2	0,6033	0,6283
55	20,2	8,3	0,5982	18,4	7,7	0,5969	18,3	7,7	0,5703	0,5885
60	19,4	7,7	0,5585	17,6	7,5	0,5515	17,6	7,7	0,5317	0,5472
65	18,7	7,9	0,5238	16,9	7,3	0,5118	17,0	7,3	0,4986	0,5114
70	18,0	8,1	0,4891	16,6	7,5	0,4948	16,4	7,6	0,4656	0,4831
75	17,0	8,2	0,4395	15,9	7,8	0,4550	15,9	8,0	0,4380	0,4442
80	17,0	8,2	0,4395	15,4	7,6	0,4266	15,4	7,6	0,4105	0,4255
85	16,1	8,6	0,3948	14,7	7,5	0,3869	14,8	7,6	0,3774	0,3864
90	15,9	7,8	0,3849	14,3	8,2	0,3642	14,5	7,6	0,3609	0,3700
95	15,3	7,8	0,3552	13,7	7,9	0,3301	14,1	8,1	0,3389	0,3414
100	14,8	8,1	0,3303	13,4	8,4	0,3131	13,7	7,8	0,3168	0,3201
105	14,5	8,5	0,3155	13,0	8,4	0,2904	13,3	7,0	0,2948	0,3002
110	13,9	8,1	0,2857	12,7	8,3	0,2734	13,0	7,4	0,2783	0,2791
115	13,7	8,1	0,2758	12,2	8,5	0,2450	12,6	7,7	0,2562	0,2590
120	13,4	7,8	0,2609	11,9	8,3	0,2279	12,3	7,8	0,2397	0,2428
125	13,1	8,1	0,2460	11,8	7,7	0,2223	12,0	7,6	0,2232	0,2305
130	12,8	8,5	0,2311	11,4	7,4	0,1996	11,6	7,6	0,2011	0,2106
135	12,5	8,5	0,2163	11,2	8,2	0,1882	11,4	7,6	0,1901	0,1982
140	12,2	8,2	0,2014	11,0	7,9	0,1768	11,3	7,8	0,1846	0,1876
145	11,9	7,8	0,1865	10,7	7,7	0,1598	10,9	8,3	0,1626	0,1696
150	11,7	7,7	0,1766	10,5	8,0	0,1485	10,8	8,1	0,1571	0,1607
155	11,4	7,9	0,1617	10,3	8,1	0,1371	10,5	7,7	0,1405	0,1464
160	11,2	8,4	0,1518	10,2	7,5	0,1314	10,3	7,5	0,1295	0,1376
165	11,0	8,6	0,1419	10,1	7,9	0,1258	10,2	7,6	0,1240	0,1305
170	10,7	7,8	0,1270	9,8	7,8	0,1087	10,0	8,0	0,1130	0,1162
175	10,5	8,3	0,1171	9,7	7,4	0,1031	9,9	8,1	0,1075	0,1092
180	10,4	8,4	0,1121	9,5	7,3	0,0917	9,7	8,2	0,0965	0,1001
185	10,2	7,8	0,1022	9,5	8,3	0,0917	9,7	7,7	0,0965	0,0968
190	10,1	7,7	0,0972	9,4	7,4	0,0860	9,5	7,4	0,0854	0,0896
195	9,9	8,2	0,0873	9,3	8,1	0,0803	9,4	7,7	0,0799	0,0825
200	9,8	8,6	0,0823	9,1	8,1	0,0690	9,3	8,1	0,0744	0,0752
205	9,6	8,2	0,0724	9,1	7,6	0,0690	9,2	8,3	0,0689	0,0701
210	9,6	7,7	0,0724	9,0	7,7	0,0633	9,1	8,4	0,0634	0,0664
215	9,5	7,7	0,0674	8,8	7,8	0,0520	9,1	7,9	0,0634	0,0609

<i>t</i> (min)	Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			<i>RT</i> Médio
	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	
220	9,4	8,1	0,0625	8,7	7,4	0,0463	9,0	7,6	0,0579	0,0556
225	9,3	8,2	0,0575	8,7	7,8	0,0463	8,9	7,7	0,0524	0,0521
230	9,2	8,6	0,0526	8,6	7,7	0,0406	8,7	7,4	0,0414	0,0448
235	9,1	8,8	0,0476	8,6	7,7	0,0406	8,7	7,7	0,0414	0,0432
240	9,1	7,7	0,0476	8,5	7,6	0,0349	8,7	8,2	0,0414	0,0413
245	9,0	7,9	0,0426	8,4	7,9	0,0293	8,6	8,5	0,0358	0,0359
250	8,9	7,8	0,0377	8,4	8,2	0,0293	8,5	8,3	0,0303	0,0324
255	8,8	7,8	0,0327	8,3	8,3	0,0236	8,5	8,0	0,0303	0,0289
260	8,8	8,2	0,0327	8,3	8,0	0,0236	8,4	7,7	0,0248	0,0270
265	8,7	8,8	0,0278	8,3	7,9	0,0236	8,4	8,8	0,0248	0,0254
270	8,6	8,0	0,0228	8,2	7,6	0,0179	8,3	8,2	0,0193	0,0200
275	8,6	7,8	0,0228	8,2	7,7	0,0179	8,4	8,6	0,0248	0,0218
280	8,6	7,7	0,0228	8,1	7,4	0,0122	8,3	8,7	0,0193	0,0181
285	8,5	7,8	0,0178	8,1	7,6	0,0122	8,3	8,4	0,0193	0,0165
290	8,5	8,2	0,0178	8,0	8,1	0,0065	8,3	8,7	0,0193	0,0146
295	8,4	7,8	0,0129				8,3	7,4	0,0193	0,0107
300	8,4	8,4	0,0129				8,3	8,5	0,0193	0,0107
305	8,3	8,1	0,0079				8,3	8,9	0,0193	0,0091
310	8,3	7,8	0,0079				8,3	8,2	0,0193	0,0091
315	8,3	7,7	0,0079				8,2	8,0	0,0138	0,0072
320	8,3	8,1	0,0079				8,2	8,6	0,0138	0,0072
325	8,2	7,9	0,0030				8,2	7,7	0,0138	0,0056
330	8,2	8,7	0,0030				8,2	7,4	0,0138	0,0056
335	8,2	8,6	0,0030				8,2	7,4	0,0138	0,0056
340	8,2	8,3	0,0030				8,2	8,1	0,0138	0,0056
345	8,2	7,7	0,0030				8,1	8,0	0,0083	0,0038
350	8,2	7,8	0,0030				8,2	8,6	0,0138	0,0056
355	8,1	8,2	-0,0020				8,1	8,0	0,0083	0,0021
360	8,1	8,1	-0,0020				8,1	7,7	0,0083	0,0021
365	8,1	8,4	-0,0020				8,1	7,4	0,0083	0,0021
370	8,1	8,2	-0,0020				8,0	8,2	0,0028	0,0003
375	8,1	8,1	-0,0020							-0,0007
380	8,0	8,0	-0,0070							-0,0023

*t* - tempo; *T* - temperatura no instante *t*; *T<sub>c</sub>* - temperatura da câmara; *RT* - razão de temperatura.

**Tabela 3B.** Dados experimentais e calculados da temperatura e da razão de temperatura em função do tempo de resfriamento a 10,0 °C.

<i>t</i> (min)	Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			RT Médio
	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	
0	27,1	10,9	1,0000	24,5	10,4	1,0000	24,8	9,2	1,0000	1,0000
5	26,9	10,2	0,9882	24,3	11,1	0,9862	24,6	9,8	0,9865	0,9870
10	26,8	10,8	0,9824	23,8	10,6	0,9515	23,9	10,2	0,9391	0,9577
15	26,4	11,3	0,9588	23,6	10,3	0,9377	23,3	10,9	0,8986	0,9317
20	25,8	11,6	0,9236	23,0	9,2	0,8962	22,9	10,8	0,8715	0,8971
25	25,3	10,8	0,8942	22,2	9,4	0,8408	22,1	10,2	0,8174	0,8508
30	24,5	10,2	0,8471	21,9	10,3	0,8200	21,6	9,7	0,7836	0,8169
35	24,0	9,9	0,8177	21,1	10,4	0,7647	20,9	9,6	0,7362	0,7729
40	23,2	10,6	0,7707	20,6	10,6	0,7301	20,3	10,1	0,6957	0,7321
45	22,5	10,8	0,7295	20,2	10,3	0,7024	19,7	10,8	0,6551	0,6957
50	22,2	11,0	0,7119	19,6	10,3	0,6608	19,2	10,9	0,6213	0,6647
55	21,3	10,2	0,6589	19,2	9,7	0,6332	18,7	10,0	0,5874	0,6265
60	21,0	9,4	0,6413	18,5	10,2	0,5847	18,1	9,2	0,5469	0,5910
65	20,3	9,6	0,6001	18,3	10,7	0,5709	17,7	9,3	0,5198	0,5636
70	19,6	10,1	0,5590	17,6	10,6	0,5224	17,2	10,0	0,4860	0,5225
75	19,4	10,9	0,5472	17,4	10,6	0,5086	16,9	10,7	0,4657	0,5072
80	18,8	10,7	0,5119	16,7	9,9	0,4601	16,4	10,8	0,4319	0,4680
85	18,4	10,4	0,4884	16,6	9,1	0,4532	16,1	10,2	0,4116	0,4511
90	18,0	9,9	0,4649	16,1	9,7	0,4186	15,5	9,9	0,3710	0,4182
95	17,3	9,0	0,4237	15,9	10,5	0,4047	15,2	9,0	0,3507	0,3931
100	17,1	9,7	0,4120	15,2	10,6	0,3563	14,8	9,3	0,3237	0,3640
105	16,7	10,3	0,3885	15,1	10,4	0,3494	14,7	10,2	0,3169	0,3516
110	16,3	10,8	0,3649	15,0	10,2	0,3425	14,3	10,7	0,2899	0,3324
115	15,8	10,4	0,3355	14,6	9,4	0,3148	14,2	10,8	0,2831	0,3111
120	15,6	10,2	0,3238	14,3	9,4	0,2940	13,7	9,9	0,2493	0,2890
125	15,4	9,6	0,3120	14,1	10,1	0,2802	13,7	9,8	0,2493	0,2805
130	14,9	9,2	0,2826	13,8	10,3	0,2594	13,3	8,9	0,2222	0,2547
135	14,7	9,6	0,2708	13,6	10,6	0,2456	13,2	9,9	0,2155	0,2440
140	14,5	10,2	0,2591	13,4	10,7	0,2317	13,0	10,2	0,2019	0,2309
145	14,2	10,8	0,2414	13,1	9,3	0,2109	12,6	10,7	0,1749	0,2091
150	13,7	10,8	0,2120	13,0	9,0	0,2040	12,4	10,5	0,1614	0,1925
155	13,6	10,2	0,2062	12,7	9,3	0,1833	12,4	10,1	0,1614	0,1836
160	13,4	9,3	0,1944	12,7	9,4	0,1833	12,3	8,9	0,1546	0,1774
165	13,2	8,9	0,1826	12,6	10,0	0,1763	11,9	9,4	0,1275	0,1622
170	13,0	9,7	0,1709	12,3	10,8	0,1556	12,0	10,0	0,1343	0,1536
175	12,8	10,1	0,1591	12,3	10,2	0,1556	11,7	10,7	0,1140	0,1429
180	12,6	10,8	0,1474	12,1	9,9	0,1417	11,6	11,1	0,1073	0,1321

$t$ (min)	Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			$RT$ Médio
	$T$	$T_c$	$RT$	$T$	$T_c$	$RT$	$T$	$T_c$	$RT$	
185	12,6	10,6	0,1474	11,9	9,1	0,1279	11,6	9,9	0,1073	0,1275
190	12,4	10,1	0,1356	11,9	9,6	0,1279	11,4	9,2	0,0937	0,1191
195	12,4	9,4	0,1356	11,8	10,2	0,1210	11,6	9,2	0,1073	0,1213
200	12,0	8,9	0,1121	11,4	10,3	0,0933	11,2	9,8	0,0802	0,0952
205	11,8	9,4	0,1003	11,6	10,7	0,1071	11,2	10,4	0,0802	0,0959
210	11,9	10,1	0,1062	11,3	9,9	0,0864	11,1	10,6	0,0734	0,0887
215	11,8	10,7	0,1003	11,2	9,3	0,0794	11,1	10,8	0,0734	0,0844
220	11,5	10,6	0,0827	11,2	8,9	0,0794	11,0	10,3	0,0667	0,0763
225	11,7	10,5	0,0944	11,1	10,5	0,0725	10,9	9,2	0,0599	0,0756
230	11,4	9,9	0,0768	11,0	9,8	0,0656	10,9	9,4	0,0599	0,0674
235	11,2	9,7	0,0650	10,9	10,7	0,0587	10,8	10,0	0,0532	0,0590
240	11,1	8,8	0,0592	10,8	10,4	0,0518	10,8	10,3	0,0532	0,0547
245	11,1	9,7	0,0592	10,7	9,8	0,0448	10,7	10,9	0,0464	0,0501
250	11,1	10,3	0,0592	10,7	9,9	0,0448	10,6	10,6	0,0396	0,0479
255	11,0	10,9	0,0533	10,6	8,8	0,0379	10,5	9,9	0,0329	0,0413
260	10,8	10,6	0,0415	10,6	9,4	0,0379	10,6	9,2	0,0396	0,0397
265	10,7	10,3	0,0356	10,6	10,1	0,0379	10,4	9,2	0,0261	0,0332
270	10,8	9,7	0,0415	10,5	10,5	0,0310	10,4	9,9	0,0261	0,0329
275	10,6	8,9	0,0298	10,3	10,7	0,0171	10,4	10,1	0,0261	0,0243
280	10,5	9,3	0,0239	10,4	10,8	0,0241	10,4	10,9	0,0261	0,0247
285	10,6	10,1	0,0298	10,3	9,6	0,0171	10,4	10,4	0,0261	0,0243
290	10,6	10,3	0,0298	10,4	9,6	0,0241	10,4	10,3	0,0261	0,0266
295	10,4	10,8	0,0180	10,3	9,8	0,0171	10,4	9,4	0,0261	0,0204
300	10,3	10,5	0,0121	10,2	9,6	0,0102	10,2	9,2	0,0126	0,0116
305	10,3	9,9	0,0121	10,3	10,3	0,0171	10,2	9,7	0,0126	0,0139
310	10,2	10,1	0,0062	10,3	10,8	0,0171	10,1	10,2	0,0058	0,0097
315	10,3	9,0	0,0121	10,1	10,2	0,0033	10,0	9,5	-0,0010	0,0048
320	10,2	9,2	0,0062	10,0	10,6	-0,0036				0,0009
325	10,2	9,7	0,0062							0,0021
330	10,0	9,4	-0,0055							-0,0018

$t$  - tempo;  $T$  - temperatura no instante  $t$ ;  $T_c$  - temperatura da câmara;  $RT$  - razão de temperatura.

**Tabela 4B.** Dados experimentais e calculados da temperatura e da razão de temperatura em função do tempo de resfriamento a 12,0 °C.

<i>t</i> (min)	Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			<i>RT</i> Médio
	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	
0	25,7	12,1	1,0000	25,3	12,6	1,0000	25,2	12,4	1,0000	1,0000
5	25,3	11,2	0,9705	25,1	11,4	0,9849	24,9	11,1	0,9771	0,9775
10	24,8	11,2	0,9337	24,9	10,9	0,9697	24,4	11,3	0,9390	0,9475
15	24,3	11,9	0,8969	24,4	11,3	0,9318	23,9	11,9	0,9008	0,9099
20	23,6	12,2	0,8453	23,9	11,5	0,8940	23,2	12,0	0,8474	0,8622
25	23,1	13,1	0,8085	23,4	12,1	0,8561	22,7	12,8	0,8093	0,8246
30	22,4	13,0	0,7570	22,9	13,1	0,8182	21,9	11,3	0,7482	0,7745
35	21,9	12,9	0,7201	22,3	12,8	0,7728	21,5	13,3	0,7177	0,7369
40	21,2	12,9	0,6686	21,7	12,6	0,7274	20,7	12,4	0,6567	0,6842
45	20,8	11,8	0,6391	21,1	12,6	0,6819	20,4	12,4	0,6338	0,6516
50	20,3	11,1	0,6023	20,6	11,9	0,6441	19,9	11,8	0,5957	0,6140
55	19,6	13,1	0,5507	20,3	11,0	0,6213	19,4	11,2	0,5575	0,5765
60	19,3	11,0	0,5286	19,8	11,8	0,5835	18,9	11,1	0,5194	0,5438
65	18,9	12,2	0,4992	19,3	12,3	0,5456	18,4	11,4	0,4812	0,5087
70	18,5	12,6	0,4697	18,9	13,1	0,5153	18,1	12,1	0,4583	0,4811
75	18,1	12,8	0,4402	18,4	12,6	0,4775	17,7	12,4	0,4278	0,4485
80	17,7	12,2	0,4108	18,1	12,7	0,4547	17,4	12,9	0,4049	0,4235
85	17,4	12,8	0,3887	17,8	12,0	0,4320	17,0	13,1	0,3744	0,3984
90	17,1	12,2	0,3666	17,4	12,5	0,4017	16,7	12,8	0,3515	0,3733
95	16,8	12,2	0,3445	17,1	10,7	0,3790	16,4	12,4	0,3286	0,3507
100	16,5	11,2	0,3224	16,8	11,8	0,3563	16,1	12,8	0,3057	0,3281
105	16,3	11,4	0,3077	16,4	11,3	0,3260	15,8	11,6	0,2829	0,3055
110	15,9	11,2	0,2782	16,3	13,1	0,3184	15,6	11,7	0,2676	0,2881
115	15,8	12,4	0,2709	16,1	12,8	0,3033	15,3	10,9	0,2447	0,2729
120	15,6	12,9	0,2561	15,7	12,4	0,2730	15,1	11,3	0,2294	0,2529
125	15,2	11,2	0,2267	15,6	12,8	0,2654	14,9	11,7	0,2142	0,2354
130	15,1	13,1	0,2193	15,3	12,9	0,2427	14,7	11,7	0,1989	0,2203
135	14,8	12,9	0,1972	15,2	11,8	0,2351	14,5	12,9	0,1837	0,2053
140	14,8	12,2	0,1972	14,9	11,7	0,2124	14,3	11,6	0,1684	0,1927
145	14,6	11,3	0,1825	14,8	12,1	0,2048	14,3	12,4	0,1684	0,1852
150	14,4	10,9	0,1677	14,6	13,1	0,1897	14,1	12,5	0,1532	0,1702
155	14,3	10,9	0,1604	14,5	13,0	0,1821	13,9	11,6	0,1379	0,1601
160	14,1	12,2	0,1456	14,3	12,9	0,1670	13,8	11,7	0,1303	0,1476
165	14,0	12,4	0,1383	14,2	12,6	0,1594	13,7	11,3	0,1226	0,1401
170	13,9	13,0	0,1309	14,0	11,6	0,1442	13,5	11,1	0,1074	0,1275
175	13,8	13,0	0,1235	13,9	11,1	0,1367	13,4	11,3	0,0997	0,1200
180	13,6	12,9	0,1088	13,8	11,0	0,1291	13,3	12,0	0,0921	0,1100
185	13,6	12,8	0,1088	13,7	12,1	0,1215	13,2	12,9	0,0845	0,1049
190	13,4	12,4	0,0941	13,6	12,7	0,1140	13,2	12,9	0,0845	0,0975
195	13,3	11,7	0,0867	13,4	13,1	0,0988	13,1	12,4	0,0769	0,0875

<i>t</i> (min)	Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			RT Médio
	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	RT	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	RT	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	RT	
200	13,3	12,0	0,0867	13,4	12,8	0,0988	13,1	11,6	0,0769	0,0875
205	13,1	11,4	0,0720	13,3	12,4	0,0912	13,0	11,1	0,0692	0,0775
210	13,2	11,4	0,0794	13,2	12,1	0,0837	12,9	12,2	0,0616	0,0749
215	13,1	12,4	0,0720	13,1	11,7	0,0761	12,8	11,3	0,0540	0,0674
220	12,9	13,2	0,0573	13,1	11,1	0,0761	12,7	12,2	0,0463	0,0599
225	12,9	12,6	0,0573	13,1	11,4	0,0761	12,7	12,7	0,0463	0,0599
230	12,8	12,1	0,0499	12,9	12,2	0,0609	12,7	12,7	0,0463	0,0524
235	12,8	11,2	0,0499	12,9	12,6	0,0609	12,6	11,9	0,0387	0,0499
240	12,7	10,8	0,0425	12,9	13,1	0,0609	12,6	13,0	0,0387	0,0474
245	12,7	10,9	0,0425	12,8	12,8	0,0534	12,6	11,2	0,0387	0,0449
250	12,7	11,7	0,0425	12,8	12,2	0,0534	12,4	12,8	0,0235	0,0398
255	12,6	12,7	0,0352	12,7	12,6	0,0458	12,5	11,1	0,0311	0,0374
260	12,6	12,9	0,0352	12,7	11,9	0,0458	12,4	11,6	0,0235	0,0348
265	12,5	12,9	0,0278	12,7	11,3	0,0458	12,4	12,8	0,0235	0,0324
270	12,4	13,1	0,0204	12,6	12,1	0,0382	12,4	12,6	0,0235	0,0274
275	12,4	12,4	0,0204	12,5	11,6	0,0307	12,3	12,4	0,0158	0,0223
280	12,4	12,4	0,0204	12,5	12,5	0,0307	12,3	12,8	0,0158	0,0223
285	12,3	11,1	0,0131	12,5	11,7	0,0307	12,2	12,7	0,0082	0,0173
290	12,3	10,9	0,0131	12,4	12,6	0,0231	12,3	12,4	0,0158	0,0173
295	12,3	11,3	0,0131	12,4	12,7	0,0231	12,2	12,8	0,0082	0,0148
300	12,3	12,8	0,0131	12,3	12,1	0,0155	12,2	10,9	0,0082	0,0123
305	12,3	12,9	0,0131	12,3	11,2	0,0155	12,1	12,8	0,0006	0,0097
310	12,2	12,9	0,0057	12,3	11,7	0,0155	12,2	11,9	0,0082	0,0098
315	12,2	12,6	0,0057	12,3	11,1	0,0155	12,1	12,1	0,0006	0,0073
320	12,2	11,7	0,0057	12,3	12,2	0,0155	12,1	12,7	0,0006	0,0073
325	12,2	10,8	0,0057	12,3	12,6	0,0155	12,1	12,9	0,0006	0,0073
330	12,2	11,3	0,0057	12,2	12,1	0,0079	12,0	12,6	-0,0071	0,0022
335	12,1	11,6	-0,0017	12,2	11,7	0,0079				0,0021
340	12,1	12,8	-0,0017	12,2	12,7	0,0079				0,0021
345	12,1	12,8	-0,0017	12,2	11,9	0,0079				0,0021
350	12,0	12,6	-0,0090	12,2	11,1	0,0079				-0,0004
355				12,2	11,6	0,0079				0,0026
360				12,1	13,0	0,0004				0,0001
365				12,2	11,7	0,0079				0,0026
370				12,1	12,9	0,0004				0,0001
375				12,1	12,9	0,0004				0,0001
380				12,1	12,0	0,0004				0,0001
385				12,2	11,5	0,0079				0,0026
390				12,2	10,9	0,0079				0,0026
395				12,1	11,2	0,0004				0,0001

*t* - tempo; *T* - temperatura no instante *t*; *T<sub>c</sub>* - temperatura da câmara; RT - razão de temperatura.

**Tabela 5B.** Dados experimentais e calculados da temperatura e da razão de temperatura em função do tempo de resfriamento a 14,0 °C.

<i>t</i> (min)	Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			<i>RT</i> Médio
	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	
0	25,3	14,3	1,0000	24,2	13,8	1,0000	26,8	13,8	1,0000	1,0000
5	25,0	14,4	0,9736	23,9	14,4	0,9704	26,4	13,8	0,9684	0,9708
10	24,5	13,9	0,9297	23,6	13,8	0,9408	26,1	14,6	0,9448	0,9384
15	24,1	13,4	0,8946	23,1	14,8	0,8915	25,5	14,5	0,8975	0,8945
20	23,6	13,0	0,8506	22,6	14,3	0,8422	25,1	15,4	0,8659	0,8529
25	23,1	13,3	0,8067	22,1	14,2	0,7929	24,6	15,2	0,8265	0,8087
30	22,6	14,1	0,7628	21,7	15,2	0,7534	23,8	14,6	0,7634	0,7599
35	22,1	14,2	0,7189	21,3	15,2	0,7140	23,4	14,5	0,7318	0,7215
40	21,7	14,6	0,6837	20,9	14,6	0,6745	22,9	13,8	0,6924	0,6835
45	21,1	13,3	0,6310	20,4	14,7	0,6252	22,3	13,3	0,6450	0,6337
50	20,7	14,8	0,5959	20,2	13,6	0,6055	21,7	14,4	0,5977	0,5997
55	20,2	13,7	0,5519	19,7	14,9	0,5561	21,3	13,4	0,5662	0,5581
60	19,8	13,8	0,5168	19,4	13,6	0,5265	21,0	14,3	0,5425	0,5286
65	19,4	14,7	0,4816	19,1	13,9	0,4970	20,2	14,4	0,4794	0,4860
70	19,2	14,3	0,4641	18,8	13,4	0,4674	20,1	15,1	0,4715	0,4676
75	18,8	14,0	0,4289	18,4	13,7	0,4279	19,6	14,7	0,4321	0,4296
80	18,6	14,2	0,4114	18,2	14,4	0,4082	19,3	14,9	0,4084	0,4093
85	18,1	13,9	0,3674	17,9	14,8	0,3786	19,1	14,8	0,3926	0,3795
90	17,8	14,1	0,3411	17,7	14,9	0,3589	18,7	14,6	0,3611	0,3537
95	17,7	12,7	0,3323	17,6	14,7	0,3490	18,4	13,6	0,3374	0,3396
100	17,5	12,9	0,3147	17,3	14,8	0,3194	18,1	13,9	0,3137	0,3160
105	17,3	13,2	0,2971	17,1	13,8	0,2997	17,8	13,6	0,2901	0,2956
110	17,0	13,1	0,2708	16,8	13,9	0,2701	17,5	14,8	0,2664	0,2691
115	16,7	12,9	0,2444	16,6	14,3	0,2504	17,3	13,2	0,2506	0,2485
120	16,6	13,9	0,2356	16,6	13,3	0,2504	17,1	14,3	0,2349	0,2403
125	16,4	13,4	0,2181	16,4	13,9	0,2306	16,9	14,1	0,2191	0,2226
130	16,3	13,9	0,2093	16,2	13,2	0,2109	16,7	14,9	0,2033	0,2078
135	16,1	13,8	0,1917	16,0	14,3	0,1912	16,6	14,9	0,1954	0,1928
140	15,9	14,2	0,1741	15,9	12,9	0,1813	16,3	14,8	0,1718	0,1757
145	15,8	14,5	0,1654	15,8	14,8	0,1715	16,2	14,4	0,1639	0,1669
150	15,7	14,9	0,1566	15,7	14,8	0,1616	16,1	13,7	0,1560	0,1580
155	15,6	14,5	0,1478	15,6	14,6	0,1517	15,9	14,4	0,1402	0,1466
160	15,6	14,5	0,1478	15,4	14,3	0,1320	15,7	14,5	0,1244	0,1347
165	15,4	14,7	0,1302	15,3	14,1	0,1221	15,7	13,1	0,1244	0,1256
170	15,2	12,9	0,1126	15,3	13,9	0,1221	15,6	13,4	0,1165	0,1171
175	15,2	13,7	0,1126	15,2	12,8	0,1123	15,4	13,2	0,1008	0,1086
180	15,2	13,0	0,1126	15,1	13,1	0,1024	15,3	14,3	0,0929	0,1026
185	15,1	13,0	0,1039	15,0	13,2	0,0926	15,3	14,9	0,0929	0,0964
190	14,9	13,6	0,0863	14,9	13,2	0,0827	15,2	13,7	0,0850	0,0847

$t$ (min)	Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			$RT$ Médio
	$T$	$T_c$	$RT$	$T$	$T_c$	$RT$	$T$	$T_c$	$RT$	
195	14,9	13,4	0,0863	14,8	13,8	0,0728	15,1	14,6	0,0771	0,0787
200	14,9	14,3	0,0863	14,8	13,1	0,0728	14,9	14,3	0,0613	0,0735
205	14,8	14,4	0,0775	14,7	12,8	0,0630	14,9	13,7	0,0613	0,0673
210	14,7	14,8	0,0687	14,6	14,5	0,0531	14,9	13,1	0,0613	0,0610
215	14,6	13,3	0,0599	14,6	14,6	0,0531	14,8	13,0	0,0534	0,0555
220	14,6	14,8	0,0599	14,5	14,6	0,0432	14,8	13,3	0,0534	0,0522
225	14,6	14,7	0,0599	14,4	14,1	0,0334	14,7	13,3	0,0455	0,0463
230	14,5	14,2	0,0511	14,4	14,7	0,0334	14,6	13,4	0,0377	0,0407
235	14,5	14,8	0,0511	14,4	13,7	0,0334	14,6	14,5	0,0377	0,0407
240	14,4	14,4	0,0424	14,3	14,4	0,0235	14,5	14,4	0,0298	0,0319
245	14,3	14,6	0,0336	14,3	13,1	0,0235	14,4	14,9	0,0219	0,0263
250	14,4	13,3	0,0424	14,3	13,8	0,0235	14,4	14,7	0,0219	0,0292
255	14,3	13,7	0,0336	14,3	14,2	0,0235	14,4	14,6	0,0219	0,0263
260	14,3	13,4	0,0336	14,2	13,1	0,0136	14,3	14,4	0,0140	0,0204
265	14,3	13,7	0,0336	14,1	14,9	0,0038	14,3	13,7	0,0140	0,0171
270	14,3	14,1	0,0336	14,2	14,7	0,0136	14,3	14,1	0,0140	0,0204
275	14,3	13,1	0,0336	14,1	14,2	0,0038	14,2	13,2	0,0061	0,0145
280	14,2	14,8	0,0248	14,1	14,1	0,0038	14,2	13,6	0,0061	0,0116
285	14,2	14,2	0,0248	14,1	13,6	0,0038	14,2	13,9	0,0061	0,0116
290	14,1	14,8	0,0160	14,1	13,5	0,0038	14,1	13,2	-0,0018	0,0060
295	14,1	14,6	0,0160	14,0	14,1	-0,0061	14,1	14,4	-0,0018	0,0027
300	14,1	13,6	0,0160				14,1	14,2	-0,0018	0,0047
305	14,1	14,5	0,0160				14,0	13,3	-0,0097	0,0021
310	14,1	14,4	0,0160							0,0053
315	14,1	13,6	0,0160							0,0053
320	14,1	13,1	0,0160							0,0053
325	14,1	13,6	0,0160							0,0053
330	14,0	13,0	0,0072							0,0024

$t$  - tempo;  $T$  - temperatura no instante  $t$ ;  $T_c$  - temperatura da câmara;  $RT$  - razão de temperatura.

**Tabela 6B.** Dados experimentais e calculados da temperatura e da razão de temperatura em função do tempo de resfriamento a 16,0 °C.

<i>t</i> (min)	Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			<i>RT</i> Médio
	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	<i>T</i>	<i>T<sub>c</sub></i>	<i>RT</i>	
0	26,9	17,7	1,0000	26,7	16,0	1,0000	26,6	16,7	1,0000	1,0000
5	26,6	17,7	0,9725	26,3	15,3	0,9630	26,4	17,8	0,9811	0,9722
10	26,3	17,3	0,9449	25,7	17,0	0,9074	26,4	17,2	0,9811	0,9445
15	25,8	17,3	0,8990	25,3	15,2	0,8703	26,1	17,2	0,9528	0,9074
20	25,4	16,9	0,8623	24,8	15,2	0,8240	25,8	17,1	0,9245	0,8703
25	24,9	16,8	0,8164	24,3	15,8	0,7777	25,6	16,4	0,9056	0,8332
30	24,4	17,1	0,7705	23,8	15,8	0,7314	25,1	15,7	0,8584	0,7868
35	24,1	15,7	0,7429	23,4	16,2	0,6944	24,7	15,8	0,8207	0,7527
40	23,7	15,9	0,7062	22,9	16,6	0,6481	24,2	15,3	0,7735	0,7093
45	23,3	16,1	0,6695	22,6	16,6	0,6203	23,7	15,4	0,7263	0,6720
50	22,9	16,4	0,6328	22,1	16,6	0,5740	23,3	15,5	0,6885	0,6318
55	22,4	16,2	0,5869	21,8	16,3	0,5462	22,8	15,6	0,6413	0,5915
60	22,1	16,9	0,5593	21,4	15,8	0,5092	22,4	15,9	0,6036	0,5574
65	21,8	16,7	0,5318	21,1	15,4	0,4814	22,1	16,2	0,5753	0,5295
70	21,4	16,5	0,4951	20,7	14,9	0,4444	21,7	16,5	0,5375	0,4923
75	21,0	16,2	0,4583	20,4	15,4	0,4166	21,3	16,7	0,4998	0,4582
80	20,7	15,9	0,4308	20,2	15,0	0,3980	21,0	16,5	0,4714	0,4334
85	20,4	15,3	0,4033	19,8	15,9	0,3610	20,7	16,8	0,4431	0,4025
90	20,1	15,2	0,3757	19,6	15,7	0,3425	20,4	16,7	0,4148	0,3777
95	19,8	15,5	0,3482	19,3	16,0	0,3147	20,1	16,6	0,3865	0,3498
100	19,6	14,7	0,3298	19,1	16,8	0,2962	19,8	16,7	0,3582	0,3281
105	19,4	15,7	0,3115	18,9	16,5	0,2777	19,6	16,6	0,3393	0,3095
110	19,2	15,7	0,2931	18,7	16,3	0,2591	19,3	16,1	0,3110	0,2877
115	19,0	16,1	0,2747	18,4	16,7	0,2314	19,2	16,3	0,3015	0,2692
120	18,6	16,3	0,2380	18,4	16,2	0,2314	18,9	15,2	0,2732	0,2475
125	18,6	16,1	0,2380	18,1	16,3	0,2036	18,7	15,0	0,2543	0,2320
130	18,4	16,6	0,2197	17,9	15,9	0,1851	18,5	14,9	0,2355	0,2134
135	18,2	16,1	0,2013	17,8	15,2	0,1758	18,4	15,3	0,2260	0,2010
140	18,1	16,6	0,1921	17,7	15,2	0,1665	18,2	15,6	0,2072	0,1886
145	17,9	16,2	0,1738	17,6	15,2	0,1573	18,1	15,8	0,1977	0,1762
150	17,7	14,9	0,1554	17,5	15,3	0,1480	17,9	16,1	0,1788	0,1607
155	17,6	16,1	0,1462	17,4	16,7	0,1387	17,7	16,2	0,1600	0,1483
160	17,6	16,3	0,1462	17,3	15,4	0,1295	17,6	16,5	0,1505	0,1421
165	17,4	15,6	0,1278	17,2	16,6	0,1202	17,5	16,6	0,1411	0,1297
170	17,3	16,1	0,1187	17,1	16,4	0,1110	17,4	16,4	0,1316	0,1204
175	17,2	15,7	0,1095	17,0	16,7	0,1017	17,2	16,4	0,1128	0,1080
180	17,1	14,9	0,1003	16,9	16,4	0,0924	17,1	15,8	0,1033	0,0987
185	17,0	15,0	0,0911	16,8	15,8	0,0832	17,1	16,3	0,1033	0,0925
190	16,9	15,6	0,0819	16,7	16,2	0,0739	16,9	16,1	0,0845	0,0801

$t$ (min)	Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			$RT$ Médio
	$T$	$T_c$	$RT$	$T$	$T_c$	$RT$	$T$	$T_c$	$RT$	
195	16,8	14,8	0,0728	16,7	14,8	0,0739	16,9	16,1	0,0845	0,0770
200	16,8	15,1	0,0728	16,7	14,8	0,0739	16,8	15,8	0,0750	0,0739
205	16,7	15,2	0,0636	16,6	15,5	0,0647	16,8	14,9	0,0750	0,0678
210	16,7	14,8	0,0636	16,5	15,8	0,0554	16,7	15,3	0,0656	0,0615
215	16,6	14,9	0,0544	16,4	16,3	0,0461	16,6	14,8	0,0561	0,0522
220	16,4	14,8	0,0360	16,4	16,4	0,0461	16,5	15,9	0,0467	0,0430
225	16,4	15,7	0,0360	16,3	16,6	0,0369	16,5	16,0	0,0467	0,0399
230	16,3	16,5	0,0269	16,3	16,7	0,0369	16,4	16,7	0,0373	0,0337
235	16,3	16,5	0,0269	16,2	16,7	0,0276	16,4	15,1	0,0373	0,0306
240	16,3	15,9	0,0269	16,2	16,1	0,0276	16,3	16,4	0,0278	0,0274
245	16,2	16,1	0,0177	16,2	16,5	0,0276	16,2	15,9	0,0184	0,0212
250	16,2	16,3	0,0177	16,2	16,1	0,0276	16,2	16,1	0,0184	0,0212
255	16,2	16,6	0,0177	16,1	15,3	0,0184	16,2	16,1	0,0184	0,0181
260	16,1	16,6	0,0085	16,1	14,8	0,0184	16,2	16,1	0,0184	0,0151
265	16,0	15,0	-0,0007	16,1	15,1	0,0184	16,2	14,8	0,0184	0,0120
270				16,1	15,6	0,0184	16,1	14,8	0,0089	0,0091
275				16,0	14,9	0,0091	16,1	15,2	0,0089	0,0060
280							16,0	14,8	-0,0005	0,0002

$t$  - tempo;  $T$  - temperatura no instante  $t$ ;  $T_c$  - temperatura da câmara;  $RT$  - razão de temperatura.