

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia de Alimentos
Departamento de Engenharia de Alimentos

“Propriedades Termofísicas de Polpa de Manga”

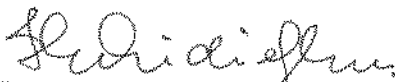
PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por MÁRCIA REGINA SIMÕES aprovada pela Comissão Julgadora em 24 de novembro de 1997.

Márcia Regina Simões
Engenheira Química

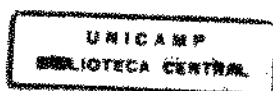
Campinas, 24 de novembro de 1997.

Prof.^a Dra. Fernanda E. X. Murr
Orientadora


Profa. Dra. FERNANDA E. X. MURR
Presidente da Banca

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Novembro de 1997
Campinas - SP



5067046

UNIDADE	30		
N.º CHAMADA	UNICAMP		
V.	Ex.		
TOMBO BC	22593		
PROC.	305/98		
C	☐	D	☒
PREÇO	24,100		
DATA	16/01/98		
N.º CPD			

CM-00104795-5

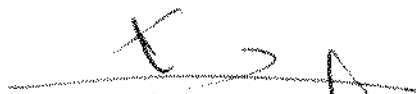
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA F.E.A. - UNICAMP

SI51p	Simões, Márcia Regina Propriedades termofísicas de polpa de manga / Márcia Regina Simões. -- Campinas, SP: [s.n.], 1997. Orientador: Fernanda Elizabeth Xidieh Murr Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. 1.Manga. 2.Materiais - propriedades térmicas. 3.Congelamento de alimentos. 4.Suco de frutas. I.Murr, Fernanda Elizabeth Xidieh. II.Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos. III.Título.
-------	---

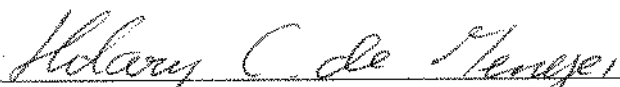
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Fernanda E. X. Murr
Orientadora



Prof. Dr. Kil Jin Park
Membro



Prof. Dra. Hilary C. de Menezes
Membro

Prof. Dra. Florencia Cecilia Menegalli
Membro

À DEUS
Aos meus pais, Lizette e Manoel
Aos meus irmãos, Li, Marcos e João
Ao Sérgio

AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ e a CAPES pela bolsa concedida durante o curso de mestrado.

À Prof^a. Dra. Fernanda E. X. Murr pela orientação, atenção e amizade durante a realização deste trabalho.

Aos Professores Kil, Florência e Hilary pelas sugestões e correções que muito contribuíram para este trabalho.

Ao Marcos e ao Pimpão, da Engenharia Agrícola, pelo auxílio concedido durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Angelo Luiz Cortelazzo (IB) da Biologia Celular, pelo auxílio na microscopia.

Aos amigos Alexandre, Rossana e Raniere, pela amizade sincera e pelos ótimos momentos que passamos juntos.

À Angela pela importante ajuda na parte experimental e também pela grande amizade.

Ao pessoal do laboratório, Flávia, Maurício, Antonio, Josivanda, Enny e Gasparetto pela amizade e momentos de descontração.

Ao pessoal de Maringá, Bá, Maurão, Fer, Noelix, Mara, Toshie, Ambrósios e Adriana pela amizade compartilhada e a convivência calorosa em Campinas.

À Catá e Alê um agradecimento especial, pela paciência, amizade e apoio constante nos momentos em que mais precisei.

À Marília que me ajudou muito durante o meu primeiro ano em Campinas.

À Aninha, Ezequias, Vito, Oscar, Lia, Kitty e Rose pela amizade.

A minha irmã Lisiane, que mesmo distante sempre soube me passar o seu apoio e carinho.

Ao Wesley pelo grande apoio dado durante a minha chegada em Campinas.

Ao Sérgio, pelo companherismo, incentivo e carinho que sempre me acompanharam durante toda a realização deste trabalho e que sem ele teria sido mais difícil.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. A Manga	3
2.2. Fibras	6
2.3. Densidade	7
2.4. Difusividade Térmica	9
2.4.1. Método do cilindro infinito para determinação da difusividade térmica em alimentos (DICKERSON, 1965).	10
2.5. Condutividade Térmica	13
2.5.1. Fonte Linear de Calor	16
2.5.2. Método da sonda	18
2.5.3. Fontes de erro	18
2.6. Determinação Simultânea da Condutividade e Difusividade Térmica.	19
2.7. Calor específico	20
2.8. Propriedades Térmicas durante o Congelamento	25
3. Materias e Métodos	28
3.1. Material	28
3.2. Métodos	29
3.2.1. Teste de Maturação	29
3.2.2. Caracterização da polpa	29
3.2.2.1. pH	29
3.2.2.2. BRIX	29
3.2.2.3. Acidez Total	30
3.2.2.4. Cinzas	30
3.2.2.5. Açúcares Redutores, não Redutores e Totais	30
3.2.2.6. Pectina	30
3.2.2.7. Sólidos Totais e Umidade	30
3.2.3. Preparação das Amostras	31

3.2.3.1. Polpa concentrada	31
3.2.3.2. Polpa de manga peneirada	31
3.2.3.3. Polpa de mangacentrifugada	31
3.2.4. Análise microscópica dos materiais utilizados	31
3.2.5. Densidade	32
3.2.6. Difusividade Térmica	32
3.2.7. Determinação de Propriedades Térmicas Utilizando o Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC)	34
3.2.7.1 Calor específico aparente	35
3.2.7.2 Temperatura de Início de Fusão, Temperatura de Pico de Fusão, Entalpia de Fusão e Conteúdo de água não Congelada	36
3.2.8. Condutividade térmica	37
3.2.9. Modelos de predição da literatura	37
4. Resultados e Discussão	41
4.1. Teste de maturação	41
4.2. Caracterização da polpa de manga	43
4.3. Microscopia	44
4.4. Densidade	47
4.5. Difusividade Térmica	53
4.6. Propriedades Térmicas no Congelamento	60
4.6.1. Termogramas	60
4.6.2. Calor específico aparente	66
4.7. Condutividade térmica	71
4.8. Conclusões	73
4.9. Sugestões	74
5. Referências Bibliográficas	75

Índice de Figuras

Figura 3.1- Fluxograma de obtenção da polpa de manga.	28
Figura 3.2- Aparato utilizado para a determinação da difusividade térmica	34
Figura 3.3- Esquema de um termograma	36
Figura 4.1- Teste de maturação.	41
Figura 4.2.-Teste de maturação-curva média.	42
Figura 4.3-Microscopia da Polpa de manga concentrada (30°Brix)-aumento de 40 vezes	45
Figura 4.4-Microscopia da Polpa de manga integral (12,7°Brix-malha=1,8mm)- aumento de 40 vezes.	45
Figura 4.5-Microscopia da Polpa de manga peneirada (12,7°Brix-malha=0,149mm)- aumento de 40 vezes.	46
Figura 4.6-Microscopia da Polpa de manga centrifugada (12,7°Brix) -aumento de 500 vezes	46
Figura 4.7-Dados experimentais da densidade da polpa de manga integral, peneirada, centrifugada e concentrada em função da temperatura.	47
Figura 4.8- Densidade da polpa de manga integral em função da temperatura, dados experimentais e de modelos da literatura.	48
Figura 4.9- Densidade da polpa de manga peneirada em função da temperatura, dados experimentais e de modelos da literatura.	48
Figura 4.10- Densidade da polpa de manga centrifugada em função da temperatura, dados experimentais e de modelos da literatura.	49
Figura 4.11- Densidade da polpa de manga concentrada em função da temperatura, dados experimentais e de modelos da literatura.	50
Figura 4.12-Ensaio para a determinação da difusividade térmica da polpa de manga integral a 12,7 °Brix.	56
Figura 4.13- Ensaio para a determinação da difusividade térmica da polpa	

de manga centrifugada a 12,7 °Brix.	57
Figura 4.14- Ensaios para a determinação da difusividade térmica da polpa de manga peneirada (malha=0,149mm)	58
Figura 4.15- Ensaios para a determinação da difusividade térmica da polpa de manga concentrada a 30°Brix.	59
Figura 4.16- Termograma da polpa de manga integral (12,7 °Brix-malha=1,8mm)	61
Figura 4.17- Termogramas da polpa de manga peneirada (12,7 °Brix-malha=0,149mm)	62
Figura 4.18- Termograma da polpa de manga centrifugada (12,7 °Brix)	63
Figura 4.19- Termograma da polpa de manga concentrada (30 °Brix)	64
Figura 4.20- Calor específico aparente médio da polpa de manga integral (12,7 °Brix-malha=1,8mm)	66
Figura 4.21. Calor específico aparente médio da polpa de manga peneirada (12,7 °Brix-malha=0,149mm)	67
Figura 4.22. Calor específico aparente médio da polpa de manga centrifugada (12,7 °Brix)	67
Figura 4.23. Calor específico aparente médio da polpa de manga concentrada (30 °Brix)	68

Índice de Tabelas

Tabela 2.1. Composição química da manga madura de variedade Keitt a 28°C	04
Tabela 2.2. Dados sobre determinações físicas e químicas de algumas variedades de mangueiras cultivadas no triângulo mineiro	05
Tabela 2.3. Modelos da literatura para prever a densidade de alimentos	08
Tabela 2.4. Modelos da literatura para a difusividade térmica de alimentos	12
Tabela 2.5. Alguns modelos da literatura para o cálculo da condutividade térmica de alimentos	16
Tabela 2.6. Modelos da literatura para predição do calor específico de alimentos	25
Tabela 3.1. Modelos da literatura utilizados para o cálculo da densidade da polpa de manga	38
Tabela 3.2. Modelos da literatura utilizados para o cálculo do calor específico da polpa de manga	39
Tabela 3.3. Modelos da literatura utilizados para o cálculo da condutividade térmica da polpa de manga	39
Tabela 3.4. Modelos da literatura utilizados para o cálculo da difusividade térmica da polpa de manga	40
Tabela 4.1- Caracterização química da polpa de manga	43
Tabela 4.2- Desvios médios das polpas de manga em relação aos modelos de ALVARADO & ROMERO, KUBOTA et al. e CHOI & OKOS.	51
Tabela 4.3-Parâmetros do modelo quadrático para a densidade de polpa de manga	52
Tabela 4.4- Parâmetros da regressão linear T_s versus tempo	53
Tabela 4.5- Difusividade térmica das polpas de manga	54
Tabela 4.6- Valores da difusividade térmica das polpas de manga calculados com os modelos de RIEDEL e MARTENS e os desvios médios relativo	55
Tabela 4.7- Valores médios de temperatura inicial de fusão, temperatura de pico de fusão, entalpia de fusão e conteúdo de água não congelada das amostras	

de polpa de manga.	60
Tabela 4.8- Calor específico médio antes e depois do congelamento.	68
Tabela 4.9- Valores de C_p em (kJ/kg°C) e o desvio médio relativo das polpas de manga utilizando os modelos de SIEBEL, DICKERSON, VIEIRA, LAMB e WATSON.	70
Tabela 4.10- Valores de condutividade térmica das polpas de manga	71
Tabela 4.11- Valores calculados de condutividade térmica e desvio médio relativo das polpas de manga utilizando os modelos de RIEDEL, CHOI & OKOS e SPELLS.	72

Nomenclatura

A	Velocidade de aquecimento	[C°/min]
B	°Brix	
Ce	Constante de Euler (0,5772157.....)	
Cp	Calor específico	[kJ/ kg °C]
ΔH	Entalpia	[kJ/kg]
i	Índice	
j	Índice	
I	Corrente que passa através do fio de aquecimento	[A]
K	Condutividade térmica	[W/m °C]
M	Massa	[kg]
n	Índice de refração (adimensional)	
n _e	Número de experimentos (adimensional)	
P	Desvio médio relativo	[%]
Q	Potência por unidade de comprimento	[W/m]
q _c	Capacidade térmica do calorímetro de mistura	[kJ]
r	Raio do termopar até a fonte de calor	[m]
R	Resistência do fio de aquecimento	[Ohm]
R	Coefficiente de correlação	
R _c	Raio do cilindro	[m]
t	Tempo	[min]
T	Temperatura	[°C]
T _c	Temperatura central	[°C]
T _s	Temperatura da superfície	[°C]
UFW	Conteúdo de água não congelada (adimensional)	
V _e	Valor experimental	

V_t	Valor obtido pelo modelo	
X	Fração mássica (adimensional)	
y	Fluxo de calor da amostra	[J/s]
y'	Fluxo de calor da safira	[J/s]

Gregas

α	Difusividade térmica	[m ² /s]
β	$\frac{r}{2\sqrt{\alpha\theta}}$ (adimensional)	
θ	Tempo de aquecimento da amostra	[s]
τ_0	Tempo de correção	[s]
ρ	Densidade	[kg/m ³]

Subscritos

1	Tempo 1
2	Tempo 2
a	Amostra
c	Carboidratos
e	Equilíbrio da mistura
f	Gordura
fa	Fusão da amostra
fw	Fusão da água
if	Início de fusão
p	Proteína
pf	Pico de fusão
s	Sólidos totais
saf	Safira
w	Água

Resumo

Neste trabalho, o objetivo foi determinar as principais propriedades termofísicas envolvidas no processamento térmico da polpa de manga de variedade Tommy Atkins. Para esta determinação, utilizou-se quatro amostras de polpa de manga: a integral, a peneirada, a centrifugada e a concentrada. A polpa integral (12,7 °Brix) foi produzida em laboratório e refinada em um despulpador de malha 1,8 mm. A polpa integral foi peneirada em uma malha 0,149 mm, centrifugada e concentrada até 30 °Brix. A caracterização da polpa foi feita determinando-se o teor de sólidos solúveis e insolúveis, umidade, cinzas, açúcares totais e redutores, pH, acidez total e pectina. A densidade foi medida por picnometria nas temperaturas de 10°C, 20°C, 30°C, 40°C e 50°C. A difusividade térmica foi medida acima do ponto de início de congelamento utilizando uma cápsula cilíndrica. O calor específico foi medido através de um Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC) de -40°C a 40°C, e também com o auxílio do DSC foi possível determinar algumas propriedades associadas ao congelamento, como a temperatura de início e de pico de fusão, a entalpia de fusão e o conteúdo de água não congelada. Alguns modelos encontrados na literatura foram utilizados para o cálculo da densidade, da difusividade térmica, do calor específico e da condutividade térmica, e os valores obtidos foram comparados aos dados experimentais das propriedades termofísicas. Observou-se que os modelos utilizados podem prever as propriedades termofísicas da polpa de manga.

Palavras Chave: Propriedades termofísicas, polpa, manga.

ABSTRACT

The objective of this work was to identify the main thermophysical properties involved in the thermal processing of mango pulp (variety Tommy Atkins). Four different types of mango pulp were used in order to identify these properties: whole, screened, centrifuged and concentrated pulp.

In order to obtain these four types of pulp, the whole pulp (12.7° Brix), obtained in the laboratory, was refined using a finisher with a 1.8 mm mesh, screened using a 0.149 mm mesh, centrifuged and concentrated to 30° Brix. The characterization of the pulp was effected by the determination of the soluble and insoluble solids in the pulp, moisture, ash, total and reducing sugar, pH, total acids and pectin. The density was determined using pycnometers at 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C and 50 °C. The thermal diffusivity was determined above the freezing point using a cylindrical capsule . A Differential Scanning Calorimeter was used to determine the specific heat, in the range from -40 °C to 40 °C, and also properties such as the initial temperature of melting and melting point, enthalpy of melting and unfrozen water content of the pulp.

Some of the thermophysical properties measured in this work, such as density, specific heat, thermal diffusivity and thermal conductivity were also calculated by some models found in the literature. A comparison of the results showed that these models could reasonably predict the thermophysical properties of mango pulp.

Key Words: thermophysical properties, mango, pulp.

1. Introdução

A manga (*Mangífera indica* L) é uma das frutas tropicais mais populares do mundo. Seu sabor e aroma agradáveis, juntamente com o seu valor nutritivo na forma de vitaminas, tais como a vitamina A e C fazem com que seja bastante apreciada.

Originária da Índia, a manga foi introduzida no Brasil no século XIX. No Brasil são cultivadas as variedades Carlota, Boubon, Espada, Coquinho, Rosa e as variedades Tommy Atkins, Haden e Keitt, cultivadas inicialmente nos Estados Unidos, foram introduzidas no Brasil a partir de 1960.

O Brasil é um dos maiores produtores de manga do mundo produzindo um total de 1.575.523 toneladas de manga em 1992 (IBGE, 1994), sendo o Nordeste a maior região produtora (ITAL, 1981).

A manga é a sexta fruta mais exportada pelo Brasil. Em 1992 exportou 9.100 toneladas ficando atrás somente da banana, laranja, melão, maçã e abacaxi. (CHITARRA & CHITARRA, 1994).

O interesse atual pela cultura não está somente na produção de frutas para consumo “in natura”, com promissor mercado consumidor, mais sobretudo, para fins de industrialização em polpas, sucos, sorvete, chiclete, compotas, geléias e derivados. O consumo per capita de manga em 1987 foi de 887,3 g (IBGE, 1992).

A manga, como a maior parte dos alimentos industrializados, está normalmente sujeita a processos de aquecimento durante a sua industrialização. Estes tratamentos térmicos são necessários para eliminar microrganismos contaminantes e inativar enzimas naturais ao produto. Quando o alimento não é consumido imediatamente, existe a necessidade de ser processado, resfriado ou congelado para conservar suas características e evitar o desenvolvimento de microrganismos indesejáveis.

O conhecimento das propriedades térmicas dos alimentos é um dado importante nos processos de aquecimento, resfriamento, evaporação e nos projetos de

equipamentos para estes fins. Nem sempre estas propriedades estão disponíveis na literatura, o que justifica que pesquisas sejam feitas na determinação destas.

O objetivo deste trabalho foi determinar as principais propriedades termofísicas envolvidas no processo térmico da polpa de manga e verificar a influência dos sólidos solúveis e insolúveis. Para analisar esta influência foram utilizadas quatro amostras de polpa de manga: a integral (12,7 °Brix e malha=1,8mm), a peneirada (12,7 °Brix e malha=0,149mm), a centrifugada (12,7 °Brix) e a concentrada (30°Brix).

As propriedades termofísicas que foram determinadas são a densidade, a condutividade térmica, a difusividade térmica, o calor específico, a fração de água congelada e a entalpia de fusão das amostras de polpa de manga. As propriedades foram comparadas também, com os modelos encontrados na literatura.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. A Manga

No Brasil existem cerca de uma centena de variedades de manga cultivadas, entre as quais deve-se ressaltar a preferência dos consumidores por determinadas variedades tais como: Haden, Bourbon, Coração de Boi (região sul) e a Rosa (nordeste), sendo que Haden e Extrema são próprias para a industrialização (ITAL, 1981).

As variedades Tommy Atkins, Haden, Kensington podem ser indicadas para satisfazer as exigências do consumidor brasileiro devido a sua baixa acidez (BOTREL, 1994).

A composição química da manga varia com as condições de cultura, variedade, estágio de maturação e etc., mas em geral, a fruta fresca tem um alto teor de sólidos solúveis totais e o conteúdo de açúcar é alto se comparado com outras frutas. As cinzas contêm cálcio e ferro, porém, em geral a manga é pobre como fonte de minerais.

RODRIGUES et al. (1977) afirmam que o valor dos sólidos solúveis nos frutos é muito importante, uma vez que, quanto maior a quantidade de sólidos solúveis existentes, menor será a quantidade de açúcar a ser adicionada na indústria quando os frutos são processados, diminuindo o custo de produção e aumentando a qualidade do produto.

DALMO et al. (1988) afirmam que para a utilização industrial da fruta, um pH inferior a 4,3 é desejável pois confere aos produtos industrializados maior resistência a contaminações microbianas, evitando o crescimento dos patogênicos.

O teor de pectina indica a consistência ou textura do produto. Na manga, ele é

de especial interesse para a conservação e o processamento industrial, variando de 0,5 a 1,0%. Sabe-se que, na transformação química que a célula sofre durante a fase de maturação do fruto a degradação de pectina é a maior delas, havendo aumento de pectinas solúveis, com conseqüente amolecimento do fruto (ROE & BRUEMMER, 1981).

A tabela 2.1 mostra a composição química da manga de variedade Keitt e a tabela 2.2 mostra alguns dados sobre propriedades químicas e físicas de 20 variedades de manga no triângulo mineiro.

Tabela 2.1 - Composição química da manga madura de variedade Keitt a 28°C.

Umidade (%)	85-90
Sólidos solúveis totais (°Brix)	19,9
PH	6,2
Vitamina C (mg/100g)	76,2
Açúcares totais (%)	17,7
Carotenóides totais (µg/100g)	5187
β-caroteno (µg/100g)	2758

Fonte: VASQUES-SALINAS & LAKSHMINROYANA (1985)

Tabela 2.2 - Dados sobre determinações físicas e químicas de algumas variedades de mangueiras cultivadas no triângulo mineiro.

Variedades	Peso dos frutos (g)	Polpa (%)	pH	Acidez Total (% ácido cítrico)	Sólidos Solúveis (° Brix)
Brasil	254,8	73,3	4,40	0,24	14,7
Simmonds	436,0	77,4	4,16	0,23	15,6
Keitt	379,0	77,0	4,24	0,28	17,8
Extrema	431,7	78,1	3,98	0,29	14,8
Kent	378,0	75,6	4,22	0,33	18,2
Carlotoão	446,2	79,3	4,04	0,32	15,8
Van Dyke	316,5	77,4	4,16	0,26	17,5
M-20.222	266,6	74,9	3,86	0,35	18,6
Eldon	499,5	77,9	4,20	0,25	14,4
Coração Magoado	246,9	74,2	4,68	0,16	14,7
Zill	359,5	73,6	4,64	0,21	18,6
Ruby	210,1	73,6	3,98	0,36	16,8
Espada de Itaparica	261,0	74,0	3,92	0,44	16,1
Edward	570,8	81,3	4,38	0,27	19,2
Surpresa	381,0	80,4	4,18	0,32	16,1
Tommy Atkins	412,5	76,7	4,24	0,21	13,9
Haden	436,9	80,7	4,14	0,23	16,1
Kensignon	418,5	74,2	4,58	0,18	16,6
Florigon	264,9	74,5	3,68	0,37	15,7

Fonte: DALMO et al. (1988)

2.2. Fibras

SOUTHGATE (1981) cita que Maccance & Lawrence em 1929 foram os primeiros a identificarem as fibras, denominando de “carboidratos não disponíveis” e que este conceito esteve presente até Hipsey (1953) sugerir o termo “Fibra Alimentar” para designar a hemicelulose, celulose e lignina presentes nas paredes celulares, até que em 1972, Trowell designou “Fibra Alimentar” como sendo o material não digerível das paredes celulares das plantas, mas em 1976 passou a incluir todos os polissacarídeos e ligninas não digeríveis pela secreção de enzimas endógenas do trato intestinal humano.

Este termo atualmente tornou-se inadequado por incluir polímeros como os produtos da reação de Maillard (ex: amido retornado) e polidextroses.

Hoje o termo mais adequado é o de Fibra Alimentar Total (FAT) que é composta basicamente de Fibra Alimentar Solúvel (FAS) formada por polissacarídeos algáceos, pectinas e algumas hemiceluloses solúveis, e por Fibra Alimentar Insolúvel (FAI) representada por celulose, lignina e hemiceluloses insolúveis (ROEHRIG, 1988).

Entre os alimentos mais ricos em fibras insolúveis podemos citar as verduras e os grãos de cereais, e os ricos em fibras solúveis o feijão, frutas, aveia e cevada. BEZERRA (1997) estudando o comportamento reológico dos sólidos insolúveis do suco de manga não encontrou grande influência sobre a reologia do mesmo.

Nutricionalmente, o termo fibra é restrito ao material filamentoso dos alimentos. Todas as estruturas celulares das paredes vegetais que não são digeridas pelos sucos digestivos humanos são chamadas de Fibra Dietética. Atualmente a designação de fibra crua foi substituída por fibra dietética, que designa a parte residual dos vegetais resistentes a hidrólise enzimática no intestino humano, embora parcialmente atacada pelas bactérias do colon.

O termo Fibra Dietética foi definida como um termo mais genérico associando a totalidade dos componentes não-digestivos das paredes celulares, incluindo a celulose, a hemicelulose, a lignina e as ceras (FRANCO, 1992).

O termo fibra crua está relacionado a um resíduo heterogêneo que resta após os alimentos vegetais terem sido tratados sucessivamente com álcalis e ácidos diluídos sob condições especiais. As fibras dietéticas são constituídas por uma associação de polímeros de alto peso molecular que são macromoléculas compreendendo dois grupos químicos: aqueles com estrutura de polissacarídeos vegetais, como a celulose, a hemicelulose, a pectina e outros grupos sem a referida estrutura, como a lignina, as gomas e as mucilagens.

2.3. Densidade

A tabela 2.3 mostra alguns modelos de predição de densidade encontrados na literatura para alimentos.

CHOI & OKOS (1983) trabalharam com o suco de tomate em uma ampla faixa de temperatura, de 20 a 150°C, e obtiveram equações para o cálculo da densidade que é baseado na temperatura, no teor de umidade (X_w) e no teor de sólidos totais (X_s).

Riedel (1949) citado por CHOI & OKOS (1986) sugere a determinação da densidade de sucos de fruta utilizando um modelo em função do índice de refração (n) dos mesmos, com um erro de cerca de 2%.

ALVARADO & ROMERO (1989), utilizando sucos e polpas de frutas a diferentes concentrações e temperaturas, obtiveram equações para o cálculo da densidade (ρ), onde a mais simples é baseada apenas no teor de sólidos solúveis (°Brix), com um coeficiente de correlação de 0,995. Uma outra equação sugerida foi

baseada no teor de sólidos solúveis e também na temperatura, e apresentou coeficiente de correlação de 0,982. Estes autores também propuseram um modelo para o cálculo da densidade da polpa de manga que foi baseado apenas na temperatura.

Kubota et al (1980) citado por CHOI & OKOS (1986) desenvolveram um modelo para prever a densidade de solução de açúcar em função do teor de sólidos totais e da temperatura, em uma faixa de 0 a 30% de sólidos e numa faixa de temperatura de 10°C a 50°C.

Tabela 2.3 -Modelos da literatura para prever a densidade de alimentos.

Produto	Fórmula, ρ (kg/m ³)	Limitações	Autor
Suco de frutas	$\rho = [(n^2 - 1)/(n^2 + 2)] (62,4 / 0,206) (16,0185)$ n=índice de refração.		Riedel (1949) citado por CHOI & OKOS (1986)
Solução de açúcar	$\rho = 1098 + 4,26 X_s - 0,049 (T + 273)$	T: 10-50°C X _s : 0-30 %	Kubota et al. (1980) citado por CHOI & OKOS (1986)
Suco de tomate	$\rho = \rho_w X_w + \rho_s X_s$ $\rho_w = 999,89 - 0,06033 T - 0,003671 T^2$ $\rho_s = 1469,3 + 0,5467 T - 0,00695 T^2$	T: 20-150°C	CHOI & OKOS (1983)
Polpas e sucos de frutas	$\rho = 996 + 4,17 B$	B: 5 - 30 %	ALVARADO & ROMERO (1989)
Polpas e sucos de frutas (geral)	$\rho = (1002 + 4,61 B) - 0,460 T + 7,001 \cdot 10^{-3} B T^2 - 9,175 \cdot 10^{-5} T^3$	T: 0 - 80°C X _w : 20-95.2%	ALVARADO & ROMERO (1989)
Polpa de manga	$\rho = (1087 - 1,064 T + 21,887 \cdot 10^{-3} T^2 - 26,160 \cdot 10^{-5} T^3)$		ALVARADO & ROMERO (1989)

2.4. Difusividade Térmica

SINGH (1982) descreve que propriedades como a condutividade térmica, calor específico e densidade desempenham uma importante função no desenho e análise de processos alimentícios e equipamentos. Em situações onde a transferência de calor ocorre em regime transiente, a propriedade chamada difusividade térmica é a mais usada. A difusividade térmica é a razão entre a habilidade em transferir calor e a capacidade de armazenar calor, expressas como:

$$\alpha = \frac{K}{\rho.C_p} \quad (2.1)$$

onde

α = Difusividade térmica;

K= Condutividade térmica;

C_p = Calor específico;

ρ = Densidade.

O significado físico da difusividade térmica nos dá a medida de como a temperatura de um material pode variar quando submetido a uma situação de aquecimento ou resfriamento.

HAYES (1984) determinou a difusividade térmica da polpa de mamão a uma temperatura de 42,8 °C, através da equação de transferência de calor para um cilindro infinito. O valor encontrado da difusividade térmica da polpa (contendo cerca de 87,5% de água) foi de $1,52 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

HAYAKAWA & SUCCAR (1983) fizeram uma análise da equação de condução de calor e desenvolveram um método para determinar experimentalmente o

valor da difusividade térmica de materiais sólidos homogêneos e de forma esférica. Este procedimento foi utilizado para determinar a difusividade térmica de tomates frescos que foi da ordem de $1,80 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, a uma temperatura de 43°C .

GAFFNEY et al. (1980) apresentaram valores de difusividade térmica de diferentes frutas e vegetais obtidos por vários autores. Comparando os valores para um dado produto, observou-se que variaram consideravelmente, com diferenças de 25% ou mais para a maioria dos produtos, chegando a 50% para a toronja, 78% para as batatas, 80% para a batata doce e 93% para a maçã.

2.4.1. Método do cilindro infinito para determinação da difusividade térmica em alimentos (DICKERSON, 1965).

DICKERSON (1965) construiu um aparato experimental em que utiliza condições de transferência de calor em regime transiente, onde apenas dados de tempo-temperatura são necessários para o cálculo da difusividade térmica de alimentos.

A equação que permite com que a difusividade térmica seja determinada através do método de DICKERSON (1965) é descrita através da equação de transferência de calor em coordenadas cilíndricas da seguinte forma:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (2.2)$$

Considerando que:

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = A \quad (2.3)$$

onde A é igual a velocidade constante de aquecimento em todos os pontos do cilindro.

A equação (2.2) fica:

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = A = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (2.4)$$

O fato do gradiente de temperatura $\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)$ não ter uma grande dependência com o tempo, torna a equação (2.4) da seguinte forma:

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = \frac{A}{\alpha} \quad (2.5)$$

As condições de contorno da equação são:

$$T = T_s: \quad \theta > 0; r = R_c \quad (2.6)$$

$$\frac{dT}{dr} = 0 \quad \theta > 0; r = 0 \quad (2.7)$$

Aplicando as condições de contorno acima, temos:

$$T_s - T = \frac{A}{4\alpha} (R_c^2 - r^2) \quad (2.8)$$

Para $r = 0$ a equação (2.8) torna-se:

$$T_s - T_c = \frac{A R_c^2}{4 \alpha} \quad (2.9)$$

Portanto, conhecendo a velocidade constante de aquecimento (A), o raio do cilindro (R), a diferença de temperatura ocorrida durante o experimento ($T_s - T_c$) que não varia com o tempo, é possível determinar a difusividade térmica da amostra em um experimento que tem curta duração quando comparada com métodos estacionários, que necessitam alcançar o equilíbrio.

Muitos autores utilizaram a metodologia de DICKERSON (1965), entre eles podemos citar: SILVA (1997) que trabalhou com polpa de abacaxi em duas concentrações, 15 e 25 °Brix, e encontrou valores de $1,84 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,74 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivamente; MAGEE & RANSBURG (1995) trabalharam com batatas e farinha de trigo e encontraram valores de $1,44 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,04 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente; VIEIRA (1996) que determinou a difusividade térmica do suco de laranja em nove diferentes concentrações, de 11 a 65 °Brix e encontrou uma relação cúbica com a concentração e RIZVI et al. (1980) determinou a difusividade térmica de uma mistura de proteína de soja, trigo e outras proteínas e encontraram um valor de $9,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

A tabela 2.4 mostra alguns modelos encontrados na literatura para a difusividade térmica de alimentos.

Tabela 2.4 - Modelos da literatura para a Difusividade Térmica de alimentos

Produto	Fórmula, $\alpha \text{ (m}^2/\text{s)}$	Limitações	Autor
Alimentos em geral	$\alpha = 0,088 \cdot 10^{-6} + (\alpha_w - 0,088 \cdot 10^{-6}) X_w$	$X_w > 60\%$	Riedel (1969) citado por CHOI & OKOS (1986)
Alimentos em geral	$\alpha = [0,057363 X_w + 0,000288 (T+273)] \cdot 10^{-6}$		Martens (1980) citado por SINGH (1982)
Alimentos em geral	$\alpha = [0,146 X_w + 0,100 X_f + 0,075 X_p + 0,082 X_c] \cdot 10^{-6}$	T: 20°C	Martens (1980) citado por SINGH (1982)
Suco de tomate	$\alpha = \alpha_w X_w + \alpha_s X_s$ $\alpha_w = [0,1363 + 0,004875 T - 0,000001632 T^2] \cdot 10^{-6}$ $\alpha_s = [0,009508 + 0,000234 T + 0,000001761 T^2] \cdot 10^{-6}$	T: 20-150°C	CHOI & OKOS (1983)

Riedel, 1969 citado por CHOI & OKOS, 1986 propôs para alimentos em geral um modelo que é baseado somente no teor de umidade da amostra (X_w).

Martens (1980) citado por SINGH (1982) propôs dois modelos, um que é função do teor de gordura (X_f), de carboidratos (X_c), de proteínas (X_p), e da umidade (X_w), encontrando uma pequena influência do teor de proteína, gordura e carboidratos,

e outro que é baseado na temperatura e no teor de umidade (X_w), que foi obtido através de uma regressão linear feita com 246 valores publicados de difusividade térmica de uma variedade de alimentos.

CHOI & OKOS (1983) propôs um modelo mais específico e complexo que é função também da temperatura e do teor de sólidos do suco de tomate.

2.5. Condutividade Térmica

A condutividade térmica de um material é a medida da sua habilidade de conduzir calor.

Os métodos utilizados para determinar a condutividade térmica são o estacionário e o transiente. Estes métodos consistem em resolver a equação de condução de calor em diferentes geometrias: placas paralelas, cilindros concêntricos ou esferas concêntricas, (CHOI & OKOS, 1986; MOHSENIN, 1980 e REIDY & RIPPEN, 1971).

O uso do método estacionário é limitado devido ao longo tempo necessário para a realização do experimento, e as formas geométricas especiais da amostra. Esse longo tempo pode causar migração de umidade da amostra ou migração de umidade no seu interior (REIDY & RIPPEN, 1971).

A determinação da condutividade térmica em regime transiente pode ser feita através de qualquer montagem que satisfaça as condições de contorno necessárias para uma solução particular da equação 2.2., apresentado no item (2.4.1).

No caso do método transiente, a técnica da fonte linear de calor e da sonda são bastante utilizadas em medidas de condutividade térmica. van der HELD & van der DRUNER, 1949 utilizando a técnica da fonte linear de calor fizeram as primeiras

medidas em líquidos, trabalhando com água, líquidos orgânicos e ácidos inorgânicos obtiveram desvios da ordem de 2% quando comparados com a literatura.

VOUDOURIS & HAYAKAWA (1994) desenvolveram um método numérico para determinação simultânea da difusividade térmica e da condutividade térmica utilizando um ponto de fonte de calor. O método foi testado em 15 alimentos diferentes, obtendo bons resultados para a condutividade térmica quando comparados com a literatura, mas para a difusividade térmica o método mostrou-se adequado apenas para alimentos com altos valores de difusividade térmica. Segundo os autores, antes do método ser convalidado experimentalmente deve-se estudar a influência de alguns parâmetros chave para a sonda, como a relação entre o comprimento e diâmetro, a taxa de geração de calor e o período de teste para a determinação da difusividade e da condutividade térmica.

MURAKAMI et. al. (1996) estudaram alguns erros associados aos parâmetros envolvidos na construção da sonda tais como: o tubo da sonda, o sensor de temperatura e o fio aquecedor. Estes autores discutem quais são os parâmetros que produzem um menor erro na determinação da condutividade térmica de alimentos

A condutividade térmica depende do teor de umidade ou da concentração de sólidos em materiais biológicos. Alguns autores (VIEIRA, 1996; HALLIDAY et al., 1995; CHOI & OKOS, 1983), determinaram a variação da condutividade térmica em função do teor de umidade ou da concentração.

VIEIRA (1996) obteve uma equação cúbica que relaciona o teor de sólidos solúveis com a condutividade térmica do suco de laranja e verificou que a condutividade diminui quando aumentamos o teor de sólidos solúveis.

CHOI & OKOS (1983) obtiveram uma equação que relaciona a temperatura, o teor de umidade e o teor de sólidos totais com a condutividade do suco de tomate.

Dados de propriedades térmicas já foram coletados por diversos autores.

POLLEY et al., 1980; SWEAT, 1974 e QASHOU et al., 1972 relataram uma compilação de dados experimentais de condutividade térmica para alimentos, incluindo suco de frutas.

BUHRI & SINGH (1993) mediram a condutividade térmica de rabanete, nabo, maçã, batata e cenoura, encontrando valores de 0,499, 0,480, 0,552, 0,405 e 0,564 W/m°C, respectivamente, para uma faixa de temperatura de 40 a 50°C, utilizando um Calorímetro Diferencial de Varredura modificado. Esta modificação foi feita inserindo um termopar na amostra a uma profundidade conhecida. Para uma completa validação do método os autores sugerem que seja estudado com alimentos a altas, e também, a baixas temperaturas.

A tabela 2.5 mostra alguns modelos de predição da condutividade térmica encontrados na literatura.

Os modelos mais simples são baseados apenas no teor de umidade da amostra (X_w). Baseado nisto, SWEAT (1974) determinou um modelo para o suco de maçã e SPELLS (1960) propôs um modelo para alimentos com teores de umidade maiores que 50%.

Riedel (1949) citado por CHOI & OKOS (1986) apresentou um modelo que é função da temperatura e da umidade e cita que a precisão deste modelo é de 1% de erro na faixa de temperatura de 10 a 80°C.

CHOI & OKOS (1983) trabalhando com suco de tomate apresentaram um modelo mais completo em função da temperatura e dos sólidos totais.

ZIEGLER et al. (1985) apresentaram modelos quadráticos para o suco de maçã e laranja apenas em função do teor de sólidos (X_s).

Anderson (1950) citado por CHOI & OKOS (1983) apresentou um modelo para os alimentos que é função da condutividade térmica da água e da condutividade

térmica dos sólidos.

Tabela 2.5 - Alguns modelos da literatura para o cálculo da condutividade térmica de alimentos.

Produto	Fórmula, K (W/m °C)	Limitações	Autor
Suco de frutas	$K = [326,58 + 1,0412 T - 0,00337 T^2] [0,46 + 0,54 X_w]$ $1,73 \cdot 10^{-3}$	T: 0-80°C	Riedel (1949) citado por CHOI & OKOS (1986)
Materiais biológicos	$K = K_w X_w + K_s (1 - X_w)$		Anderson (1950) citado por CHOI & OKOS (1986)
Materiais biológicos	$K = 0,056 + 0,57 X_w$	$X_w > 50\%$	SPELLS (1960)
Maça	$K = 0,148 + 0,00493 X_w$		SWEAT (1974)
Suco de tomate	$K = K_w X_w + K_s X_s$ $K_w = 0,5747 + 0,001723 T - 0,000006722 T^2$ $K_s = 0,05998 + 0,001593 T + 0,00000163 T^2$	T: 20-150°C	CHOI & OKOS (1983)
Suco de laranja	$K = [60,36 - 2,31 X_s + 0,041 X_s^2] \cdot 10^{-2}$	T: 20°C	ZIEGLER et al. (1985)
Suco de maça	$K = [60,97 - 0,1542 X_s + 0,0028 X_s^2] \cdot 10^{-2}$	T: 20°C	ZIEGLER et al. (1985)

2.5.1. Fonte Linear de Calor

Se considerarmos a aplicação de calor vinda de uma fonte de calor infinitamente longa, de resistência constante e diâmetro zero no interior de um material homogêneo infinito, inicialmente isotérmico e em equilíbrio com a vizinhança, então o fluxo de

calor pode ser expresso pela equação (2.2) apresentada no item (2.4.1)

Esta equação pode ser resolvida para o caso da temperatura como uma função da quantidade de calor, tempo, posição espacial e propriedades térmicas, da seguinte forma:

$$T = \frac{Q}{2\pi K} \int_{\beta}^{\infty} \frac{\exp(-\beta^2) d\beta}{\beta} \quad (2.10)$$

onde:

$$\beta = \frac{r}{2\sqrt{\alpha\theta}}$$

NIX et al (1967) apresenta a seguinte série para definir a integral da equação (2.10).

$$T = \frac{Q}{2\pi K} \left[\frac{-Ce}{2} - \ln \beta + \frac{\beta^2}{2!} - \frac{\beta^4}{4.2!} \dots \right] \quad (2.11)$$

Para pequenos valores de r , isto é $\beta < 0.16$, a integral exponencial da equação (2.11) pode ser simplificada, com menos que 1% de erro (INGERSOLL et al, 1954), por:

$$T = \frac{Q}{2\pi K} \left[\ln \left(\frac{1}{\beta} \right) - \frac{Ce}{2} \right] \quad (2.12)$$

Se a equação (2.12) é calculada em um ponto próximo a fonte linear e entre os tempos θ_1 e θ_2 a mudança de temperatura será:

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{4\pi K} \ln \left(\frac{\theta_2}{\theta_1} \right) \quad (2.13)$$

2.5.2. Método da sonda

A única diferença entre a fonte linear de calor e o método da sonda é que no método da sonda, o fio aquecedor e o termopar estão posicionados no interior de uma agulha hipodérmica (a sonda) que pode ser facilmente inserida em diferentes materiais para medir a condutividade térmica (SWEAT, 1972 citado por BAGHE-KHANDAN, 1981).

Dos autores que trabalharam com o método da sonda podemos citar: PARK et al., 1997 que construíram e calibraram um sistema de determinação da condutividade térmica; VIEIRA, 1996 que determinou a condutividade térmica do suco de laranja a várias concentrações; CHOI & OKOS, 1983 determinaram simultaneamente a condutividade e a difusividade térmica do suco de tomate; SWEAT, 1974 a condutividade térmica de várias frutas e vegetais; SUTER et al., 1972 determinaram a condutividade e a difusividade térmica de amêndoas.

2.5.3. Fontes de erro

Algumas hipóteses da teoria não podem ser atendidas no arranjo experimental das sondas tais como: raio infinitesimal, resistência térmica de contato nulo e igualdade de propriedades térmicas entre a amostra e a sonda. Essas discrepâncias foram tratadas por van der HELD & van der DRUNEN, 1949 e por MURR (1992). Estes autores demonstraram que essas diferenças, entre a teoria e a prática, podem ser as causadoras de um erro constante no tempo observado. Estas diferenças geram um calor anterior à medição do tempo do experimento.

Portanto, utiliza-se um termo de correção, τ_0 , que é utilizado para corrigir estas diferenças. Desta forma, teremos a equação utilizada para o cálculo da condutividade

térmica:

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi K} \ln \left[\frac{\theta_2 - \tau_0}{\theta_1 - \tau_0} \right] \quad (2.14)$$

Uma outra fonte de erro está relacionada com a distorção no campo cilíndrico de temperatura causada pelo fluxo de calor axial. Isto ocorre porque teoricamente a sonda, fonte linear de calor infinita tem na realidade dimensões finitas. Para minimizar tal erro, a razão entre comprimento e diâmetro da sonda deve ser no mínimo igual a 100 (HOOPER & LEPPER, 1950).

Outros pesquisadores tais como: MURR (1992), CANEDO (1975) e SWEAT (1974), utilizaram uma constante ao invés do fator tempo de correção. Esta pode ser obtida, calibrando-se a sonda com um material cujo valor de condutividade seja conhecido, como glicerina ou água imobilizada com agar. Para evitar a convecção em líquidos alguns autores recomendam que seja utilizada lã de vidro nas amostras a serem medidas (CHOI & OKOS, 1983).

2.6. Determinação Simultânea da Condutividade e Difusividade Térmica.

NIX et al. (1967) demonstraram que o equipamento para medir a condutividade térmica pode ser usado para a determinação direta da difusividade térmica se um termopar adicional for colocado na amostra a uma distância radial conhecida, tal que $0,16 < \beta < 3,1$. Os 40 primeiros termos da equação (2.11) precisam ser calculados para assegurar a convergência.

O tempo de cálculo pode ser minimizado se $0,2 < \beta < 0,5$ (SUTER et al., 1972).

Alguns autores utilizaram a fonte linear de calor para determinar simultaneamente a condutividade e a difusividade térmica, entre eles podemos citar: SREENARAYANAN & CHATTOPADRYAY, 1986 com o farelo de arroz; RAO et

al., 1975 para batatas e abóboras e NIX et al., 1967 para a borracha de silicone. CHOI & OKOS, 1983 determinaram simultaneamente a condutividade e a difusividade térmica para o suco de tomate utilizando o método da sonda.

2.7. Calor específico

Nos processos de transferência de calor, a que são submetidos os materiais biológicos, a variação de pressão é muito pequena. Portanto, utiliza-se o conceito de calor específico à pressão constante (MONSENIN, 1980).

KAZARIAN & HALL (1965) tem reconhecido a dificuldade de se medir o calor específico de materiais biológicos devido ao conteúdo de umidade do material e ao calor de absorção. Devido a estas dificuldades é que poucos valores de calor específico estão disponíveis na literatura.

Muitos métodos, utilizados para determinar o calor específico, baseiam-se no equilíbrio térmico estabelecido entre um primeiro corpo, que se pretende determinar o calor específico, e um segundo corpo de calor específico conhecido.

Existem dois métodos para determinar o calor específico de materiais biológicos: o método transiente ou método de mistura direta e o método estacionário. No método estacionário a amostra é colocada em uma pequena câmara por onde passa uma corrente elétrica. WRIGHT & PORTERFIELD, 1970 citam que a maior fonte de erro deste método está na determinação da temperatura da amostra.

Dois equipamentos são normalmente utilizados para determinação do calor específico: o calorímetro de mistura e o calorímetro diferencial de varredura (DSC), SWEAT (1986).

Alguns autores como: MOHSENIN, 1980; HWANG & HAYAKAWA, 1979; e KAZARIAN & HALL, 1965 citam que o método da mistura direta é bastante utilizado.

Este método consiste em utilizar um recipiente isolado, de capacidade calorífica conhecida, com um líquido inerte. O cálculo do calor específico é feito através de um balanço global de massa e energia em um sistema isolado termicamente:

$$\text{calor perdido pela amostra} = \text{calor ganho pela água} + \text{calor ganho pelo calorímetro}$$

$$Cp_a \cdot M_a (T_a - T_e) = Cp_w M_w (T_e - T_w) + Cp_c M_c (T_e - T_w) \quad (2.15)$$

$$Cp_a = \frac{Cp_w \cdot M_w \cdot (T_e - T_w) + q_c}{M_a \cdot (T_a - T_e)} \quad (2.16)$$

CHOI & OKOS (1986) citam que a maior fonte de erro do método de mistura é a fuga da energia térmica do calorímetro e a energia adicionada por agitação. Além disso, podem ocorrer erros que resultam da perda ou ganho de calor da amostra para o ambiente. HWANG & HAYAKAWA (1979) desenvolveram uma técnica para determinar esta perda ou ganho de calor.

O método de misturas foi utilizado por: VIEIRA (1996) para determinar o calor específico do suco de laranja; JHA & PRASAD (1993) em nozes; HENSE (1990) em filé de cação; SHARMA & THOMPSON (1973) em grãos de sorgo; WRIGHT & PORTEFIELD (1970) em amendoins; KAZARIAN & HALL (1965) para grãos de milho.

HWANG & HAYAKAWA (1979) desenvolveram uma metodologia para determinar o calor específico de alimentos onde não há contato direto da amostra com o líquido de capacidade calorífica conhecida. Este método pode ser aplicado para determinar o calor específico de alimentos altamente higroscópicos. Desta forma, o calor de absorção e algumas reações químicas que poderiam ocorrer são eliminados. Este procedimento pode ser utilizado para produtos altamente desidratados e de alto teor de umidade. VIEIRA (1996) utilizou esta técnica para determinar o calor

específico do suco de laranja encontrando bons resultados quando comparados com os da literatura.

O'NEILL (1966) descreveu um método para determinação do calor específico utilizando o Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC). Esta metodologia é baseada na proporcionalidade entre o fluxo de calor da amostra e o calor específico instantâneo, quando este está sujeito a um programa linear de aumento de temperatura. Através do registro deste fluxo de calor em função da temperatura, e comparando com o fluxo de calor de um material de referência submetido as mesmas condições, o calor específico pode ser obtido em função da temperatura. Para validar este método o autor determinou o calor específico de vários compostos conhecidos tais como o diamante, o grafite e o nitrato de prata e os comparou com os valores da literatura.

A técnica do DSC é utilizada por muitos pesquisadores da área de alimentos por ser rápida, direta e necessitar somente de miligramas de amostra. No DSC a amostra de material está sujeita a um programa linear de aumento de temperatura ; e esta taxa de fluxo de calor é proporcional ao calor específico instantâneo da amostra.

O calorímetro diferencial por varredura foi utilizado por diversos pesquisadores para determinar o calor específico de alguns alimentos: LAU et al. (1992) para o suco de aipo numa faixa de temperatura de -40°C a 20°C ; DELGADO et al. (1990) para morangos congelados numa faixa de temperatura de -40°C a 10°C encontrando um valor de $3,56 \text{ J/g K}$ para uma temperatura de 10°C e RAMASWAMY & TUNG (1981) determinaram o calor específico aparente de duas variedades de maçã numa faixa de temperatura de -100°C a 80°C , encontrando um valor de $3,69 \text{ (J/kg K)}$ (variedade Golden Delicious) e $3,58 \text{ (J/kg K)}$ (variedade Granny Smith Delicious) para a maçã não congelada.

MANOHAR et al. (1991) determinaram o calor específico do suco de tamarino, utilizando o método do calorímetro diferencial por varredura sobre uma faixa de temperatura entre 308K a 348K e a diferentes concentrações, encontrando um valor de

3,32 kJ/kg K para uma temperatura de 308 K e 20,2 % de concentração. O valor do calor específico do suco de tamarino diminuiu com o aumento da percentagem de sólidos e aumentou com o aumento da temperatura.

WANG & BRENNAN (1993) determinaram o calor específico da batata em função do conteúdo de umidade numa faixa de temperatura de 40 a 70°C, utilizando a técnica do DSC proposta por O'NEILL (1966), com uma taxa de aquecimento de 10°C/min. O Cp foi relacionado com o teor de umidade e com a temperatura através de equações matemáticas.

SINGH et al. (1997) utilizou a técnica do DSC para determinar o calor específico do café fresco e do pó de café em uma faixa de temperatura de 45°C a 150°C e obtiveram uma relação linear do Cp com a temperatura.

A técnica do DSC foi utilizada por alguns autores para determinar algumas propriedades associadas ao congelamento. SERENO (1994) utilizou o DSC em uma faixa de temperatura de - 60°C a 40°C utilizando uma taxa de aquecimento de 3°C/min, para determinar o calor específico aparente, a temperatura inicial de fusão, a temperatura de fusão, a entalpia de fusão e a fração de água não congelada de pera, maçã e tomate, apresentando um desvio menor que 5% quando comparado com dados da literatura e BARONE (1997) determinou estas propriedades para a cebola in natura e desidratadas. WANG & KOLBE (1991) também utilizaram o DSC para determinar o calor específico aparente, o conteúdo de água não congelada e a entalpia de amostras de surimi (polpa de peixe), a uma taxa de temperatura de 2°C/min de - 80°C a 40°C.

A precisão de medidas de calor específico feitas com o DSC foi estudado por TERESA et. al. (1995), e concluíram que uma maior precisão é obtida nas medidas de Cp quando se utiliza uma maior quantidade de amostra, isto foi verificado fazendo experimento com três quantidades de amostras diferentes, e baixas taxas de aquecimento. Os autores compararam também os valores de Cp obtidos do DSC com

calorímetro adiabático e verificaram um desvio menor que 5% nas medidas.

A tabela 2.6 mostra alguns modelos para o calor específico encontrados na literatura. Os modelos são normalmente baseados no teor de umidade (X_w) como descritos por Siebel (1892) citado por MONSENIN (1980), DICKERSON (1968) e LAMB (1976).

CHARMA (1971) propôs um modelo que é função do teor de gordura (X_f), teor de sólidos (X_s) e também do teor de umidade.

MANOHAR et al. (1990) trabalhando com suco de tamarino, e CHOI & OKOS (1983) para o suco de tomate propuseram um modelo que é baseado no teor de sólidos totais e da umidade.

LAU et al. (1992) trabalhando com suco de aipo propuseram um modelo simples que é baseado apenas no teor de sólidos totais.

VIEIRA (1996) trabalhando com suco de laranja propôs um modelo linear baseado apenas no ° BRIX.

Watson (1989) citado por PEACOCK (1995) propôs um modelo para sucos e xaropes que é função da temperatura e do ° BRIX.

Tabela 2.6: Modelos da literatura para predição do calor específico de alimentos

Produto	Fórmula, Cp (KJ/Kg °C)	Limitações	Autor
Geral	$C_p = 0,837 + 3,349 X_w$		Siebel (1892) citado por MONSENIN (1980)
Geral	$C_p = 1,675 + 2,512 X_w$	$X_w > 50\%$	DICKERSON (1968)
Geral	$C_p = 2,093 X_r + 1,256 X_s + 4,18 X_w$		CHARM (1971)
Geral	$C_p = 1,465 + 2,721 X_w$		LAMB (1976)
Suco de tomate	$C_p = C_{pw} X_w + C_{ps} X_s$ $C_{pw} = 999,89 - 0,06033 T - 0,003671 T^2$ $C_{ps} = 1469,3 + 0,5467 T - 0,00695 T^2$	T: 20-150°C	CHOI & OKOS (1983)
Suco de tamarino	$C_p = 4,18 + M X_s$ $M = 5,03 \cdot 10^{-2} + 6,839 \cdot 10^{-5} T$	T: 35-65°C	MANOHAR et al. (1990)
Suco de aipo	$C_p = 4,22 - 0,03 X_s$		LAU et al. (1992)
Sucos e xaropes	$C_p = 4,1253 - 0,024804 B + 6,7 \cdot 10^{-5} T B$ $+ 1,8691 \cdot 10^{-3} T - 9,271 \cdot 10^{-6} T^2$	T: 40-150°C B: <80 Brix	Watson (1989) citado por PEACOCK (1995)
Suco de laranja	$C_p = 4,1713 - 0,02779 B$		VIEIRA (1996)

2.8. Propriedades Térmicas durante o Congelamento

Congelamento é um dos processos mais usados na preservação de alimentos. A diminuição da temperatura, ocorrida durante o congelamento, diminui a atividade de microorganismos e sistemas enzimáticos e reações químicas prevenindo a

deteriorização do produto.

As propriedades dos alimentos mudam sensivelmente durante o processo de congelamento. Durante o armazenamento de produtos congelados, estas propriedades podem mudar devido as flutuações de temperatura. As propriedades antes e depois do congelamento são importantes, pois influenciam na capacidade e na taxa de resfriamento dos produtos. Na maioria dos processos que envolvem transferência de calor, as propriedades dos produtos como densidade, condutividade térmica, difusividade térmica e entalpia devem ser conhecidas, e estas propriedades tendem a mudar significativamente durante a mudança de fase da água para gelo. Estas alterações tornam o estudo destas propriedades complexo, dificultando também a sua determinação experimental. (HELDMAN, 1982).

Um dos fenômenos físicos envolvidos na preservação dos alimentos congelados é a formação de água congelada. A quantidade desta é função da composição química do sistema e da temperatura, e é independente da taxa de congelamento. As medidas de fração de água congelada podem ser feitas pelo Diagrama de Fase, DSC (Calorímetro Diferencial de Varredura) e NMR (Ressonância Magnética Nuclear). (POGSAWATMANIT & MIAWAKI, 1993). A fração de água congelada afeta muito a condutividade térmica de materiais congelados, porque a condutividade térmica do gelo é quatro vezes maior do que da água. (RENAUD et al, 1992; POGSAWATMANIT & MIAWAKI, 1993).

Alimentos que necessitam de baixas temperaturas, como meio de preservar a qualidade, geralmente contém uma grande quantidade de água, que varia de 60 a 95%. A água presente nos alimentos age como um solvente para vários compostos orgânicos e inorgânicos assim como o sal e o açúcar. Quando a temperatura de um alimento diminui gradualmente, frações de gelo começam a se separar da solução a uma temperatura ligeiramente abaixo da temperatura do ponto de congelamento da água pura. Esta temperatura é referida como o ponto inicial de congelamento.

(MANNAPPERUMA & SINGH, 1989)

Propriedades térmicas de alimentos podem ser consideradas praticamente constantes a temperaturas maiores do que o ponto de congelamento, mas abaixo deste ponto as propriedades mudam drasticamente devido a formação de gelo, o qual tem propriedades claramente diferentes da água. (PASQUALONE & MASTANDREA, 1995).

3. Materias e Métodos

3.1. Material

A manga de variedade Tommy Atkins foi obtida de Petrolina-Pe, da região do Vale do São Francisco. A figura 3.1 mostra o fluxograma de obtenção da polpa de manga.

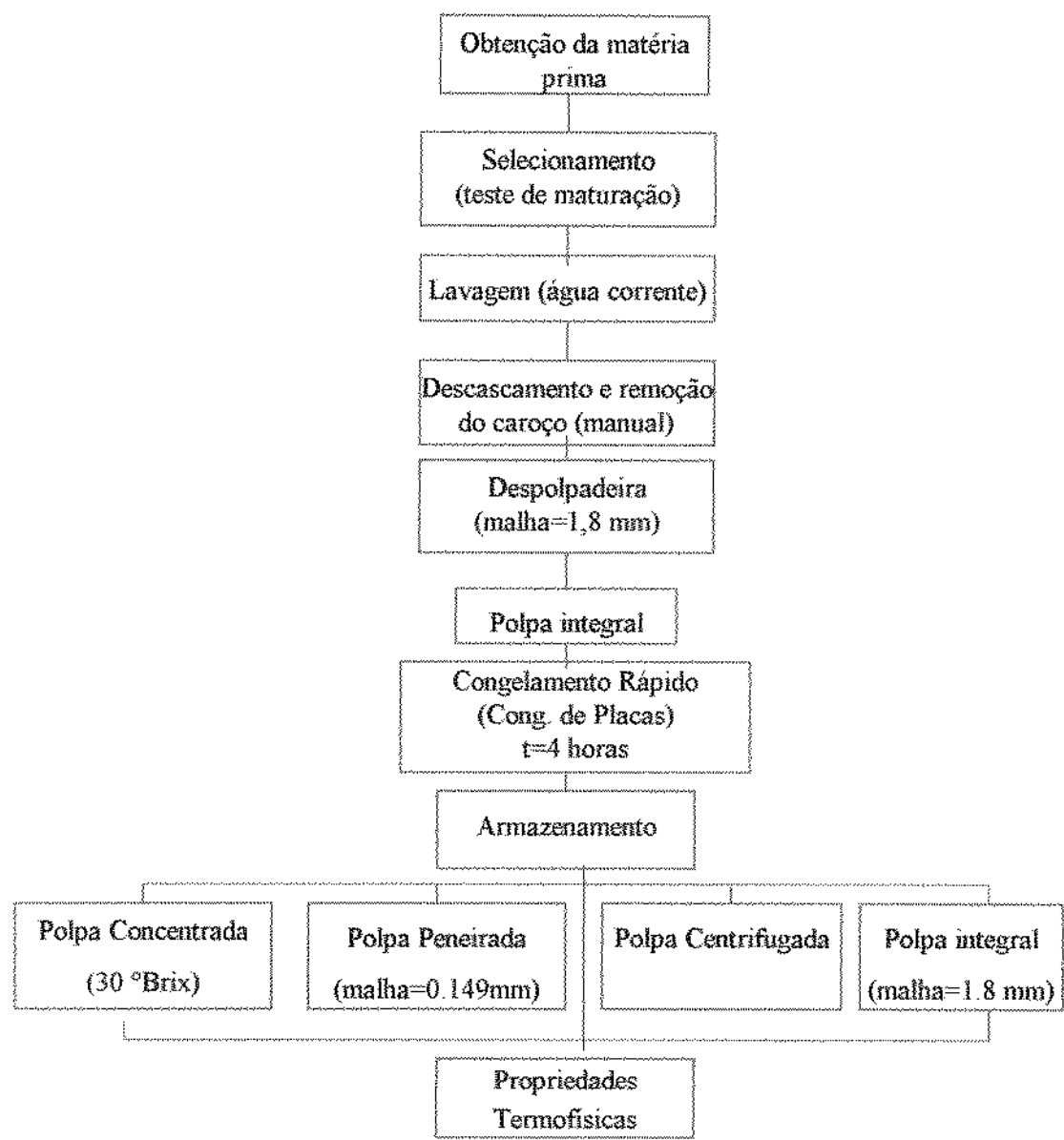


Figura 3.1 - Fluxograma de obtenção da polpa manga.

3.2. Métodos

3.2.1. Teste de Maturação

Na literatura não existe um teste para verificar a maturação da manga, ele é apenas visual, portanto foi realizado um teste com um texturômetro que relaciona a força necessária para penetrar na manga e o seu grau de maturação. O diâmetro da ponta cilíndrica e a profundidade (5mm) foram os parâmetros utilizados para simular o esforço de um dedo apertando a manga sem perfurar.

Este teste foi realizado utilizando um texturômetro marca Texture Analyser, modelo TA-XT2 e uma sonda cilíndrica de 1cm de diâmetro. O teste consistiu em fixar uma penetração (5 mm) e verificar a força necessária para provocar esta penetração. Este teste foi efetuado para padronizar a maturação da manga, pois quanto menor a força necessária para penetrar, mais elevado o grau de maturação.

3.2.2. Caracterização da polpa

A caracterização foi feita com a polpa descongelada e em triplicada e as análises foram as seguintes:

3.2.2.1. pH

O pH foi determinado pelo método potenciométrico, INSTITUTO ADOLFO LUTZ (1976), nº 4.7.2.

3.2.2.2. Brix

O Brix foi determinado pelo método refratométrico, PEARSON (1973), p. 58-60.

3.2.2.3. Acidez Total

Foi determinada segundo o método da AOAC (1980), nº 9.119. Os resultados foram expressos em porcentagem de ácido cítrico.

3.2.2.4. Cinzas

Para esta determinação foi utilizado o método descrito pela AOAC (1980) nº 11.019 e os resultados foram expressos em porcentagem (p/p).

3.2.2.5. Açúcares Redutores, não Redutores e Totais.

Os açúcares redutores e totais foram determinados utilizando a metodologia descrita pelo INSTITUTO ADOLFO LUTZ (1976). Os resultados foram expressos em porcentagem de glicose (p/p) e sacarose (p/p), respectivamente. O teor de açúcares não redutores foram obtidos pela diferença entre os açúcares totais e redutores, e o resultado foi expresso em porcentagem de sacarose (p/p).

3.2.2.6. Pectina

Foi determinado através da metodologia de RANGANNA (1978) que se baseia na neutralização das cargas dos resíduos de ácidos urônicos livres pelos íons cálcio, provocando a geleificação da pectina e sua precipitação. Os resultados são expressos em porcentagem de pectato de cálcio (p/p).

3.2.2.7. Sólidos Totais e Umidade

Os sólidos totais e a umidade foram determinados através do método descrito pelo INSTITUTO ADOLFO LUTZ (1976) nº 13.6.4, onde a água é evaporada e é feito a pesagem do resíduo não volatilizado. Os resultados foram expressos em porcentagem (p/p).

3.2.3. Preparação das Amostras

3.2.3.1. Polpa concentrada

As amostras foram concentradas em um rotavapor de laboratório. Cerca de 300g de polpa integral foram colocadas em um balão que estava conectado a um tubo rotativo por onde, através de uma bomba de vácuo (*Tecnal* modelo TE-058), provocava-se um vácuo de 740 mmHg. O balão com a amostra estava em contato com um banho a 60°C. As amostras ficaram cerca de uma hora no rotavapor até atingir a concentração desejada de 30° Brix.

3.2.3.2. Polpa de manga peneirada

Cerca de 200g de amostra foram peneiradas em agitador de peneiras marca *Produtex* (malha=0,149mm) num nível de agitação máxima por 1 hora.

3.2.3.3. Polpa de manga centrifugada

Cerca de 500g da amostra foram distribuídos em tubos de ensaio de aproximadamente 40 ml cada e levadas até uma centrífuga marca *Sorval* modelo RC5C onde permaneceram durante 30 minutos com uma rotação de 10000 rpm. O sobrenadante foi utilizado para realizar as análises e a polpa foi desprezada.

3.2.4. Análise microscópica dos materiais utilizados

Foi feita uma análise microscópica das amostras utilizadas para que visualmente fosse possível detectar a diferença entre elas.

A microscopia foi feita utilizando um microscópio tipo *Jenaval* - modelo 30-G0020C. Cerca de 5g de cada amostra foram diluídas em 20g de água destilada e homogeneizadas cuidadosamente num processo manual.

As amostras de polpa de manga integral (12,7 °Brix), peneirada (malha=0,149 mm, 12,7 °Brix), e concentrada (30 °Brix), foram fotografadas utilizando um aumento de 40 vezes e para a manga centrifugada (12,7 °Brix), foi utilizado um aumento de 500 vezes.

3.2.5. Densidade

A determinação da densidade foi feita em triplicata nas temperaturas de 10°C, 20°C, 30°C, 40°C e 50°C utilizando um picnômetro de vidro de 25 ml com termômetro. Os picnômetros foram lavados com acetona, secos e tarados. Os picnômetros cheios de amostra eram colocados em um banho ultratermostático marca *Nova Técnica* - modelo NT 281, pesados em balança analítica com precisão de 0,0001g e o volume do picnômetro era obtido utilizando-se água destilada. A densidade das amostras eram obtidos através da razão entre a massa da amostra e o volume do picnômetro.

Inicialmente as amostras foram desaeradas em um banho ultrasônico marca *Branson*, modelo 2210 para a retirada das bolhas de ar que se formaram no interior das amostras.

3.2.6. Difusividade Térmica

Com o auxílio de um aparato semelhante ao utilizado por DICKERSON (1965) a difusividade das amostras de polpa de manga foi determinada. O esquema do aparato experimental é mostrado na Figura 3.2. Este aparato consiste de uma cápsula metálica cilíndrica com termopares, um indicador de temperatura, um agitador mecânico e um banho termostático.

A cápsula cilíndrica foi construída basicamente com um material de alta

condutividade térmica, metal cromado, e isolada termicamente nas extremidades com rolhas de nylon esmerilhada. Dois termopares de cobre-constantan foram colocados, um na superfície externa e outro no centro da cápsula cilíndrica e acoplados a um medidor de temperatura. As dimensões do cilindro eram: 0,049 m de diâmetro interno, 0,30 m de comprimento total e 0,23 m de comprimento útil, preenchido pela amostra.

Em cada experimento a cápsula cilíndrica era enchida com as amostras de polpa de manga e mergulhada no banho termostático. Para evitar a convecção natural utilizou-se 0,4% de uma solução de agar. A agitação mecânica era ligada juntamente com o banho termostático que aquecia a uma taxa constante de aproximadamente 0,4 °C/min. No momento em que o aquecimento do banho era ligado um cronômetro era acionado também, e as temperaturas do centro (T_c) e da superfície do cilindro (T_s) eram acompanhadas em intervalos de 2 min até aproximadamente 65 min.

Tendo em vista as condições em que foi conduzido o experimento, a difusividade térmica pode ser determinada utilizando a equação (2.9) proposta por DICHERSON (1965).

Para obtermos os valores de (A) e ($T_s - T_c$) utilizou-se o gráfico de temperatura (T_s e T_c) versus tempo, construído com os dados experimentais. A taxa de aquecimento do banho (A) foi obtida através da inclinação da reta (T_s) versus tempo e a diferença ($T_s - T_c$) é obtido quando as duas curvas (T_s) e (T_c) tornam paralelas entre si, isto acontece quando:

$$|(T_c - T_s)_i - (T_c - T_s)_{i+1}| \leq 0,1^\circ\text{C} \quad (3.1)$$

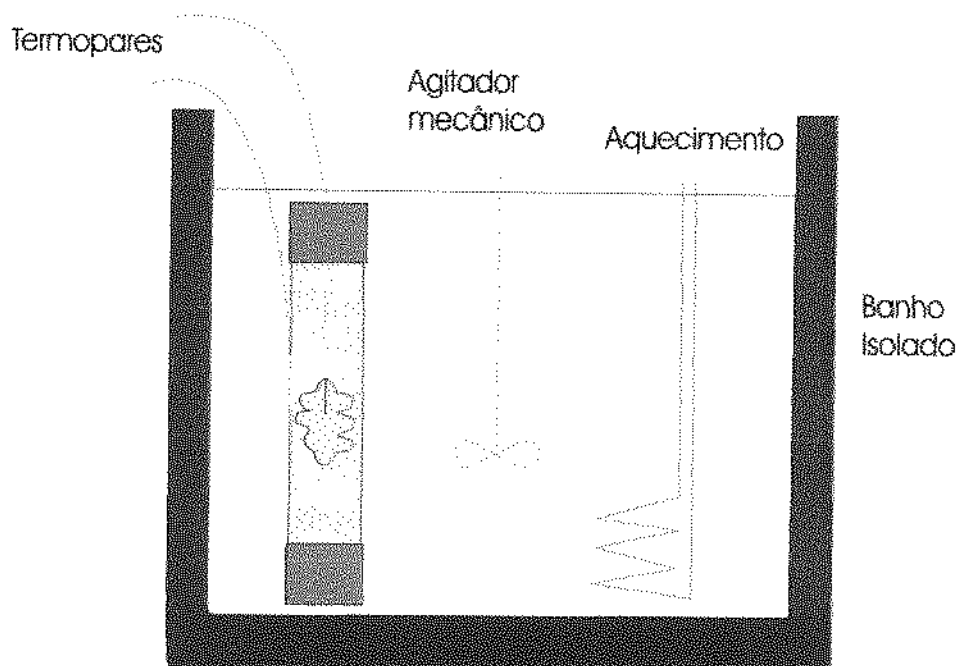


Figura 3.2. Aparato utilizado para a determinação da difusividade térmica.

3.2.7. Determinação de Propriedades Térmicas Utilizando o Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC).

Os ensaios realizados no DSC foram feitos com o objetivo de verificar a influência dos sólidos solúveis e dos insolúveis nos fenômenos de mudança de fase, a fusão da água.

As amostras, aproximadamente 14 mg, eram colocadas em cápsulas previamente taradas, fechadas com uma prensa, pesadas novamente e colocadas no DSC.

Para os ensaios calorimétricos foi utilizado um calorímetro diferencial de varredura da marca DU PONT, *modelo 910*, com aquisição de dados por computador. Os ensaios foram realizados congelando-se rapidamente a amostra em nitrogênio líquido até -40°C e depois aquecendo até 40°C a uma taxa constante de $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

3.2.7.1 Calor específico aparente

O calor específico aparente das amostras de polpa de manga (C_{pa}), foi determinado utilizando a metodologia proposta por O'NEILL (1966) que consistiu em fazer três corridas no equipamento: a primeira com as duas cápsulas vazias, para que fosse estabelecida a linha base; a segunda com uma amostra padrão de propriedades térmicas conhecidas, a safira (óxido de alumínio), e a terceira as amostras de polpa de manga.

O cálculo do calor específico da amostra foi feito obtido utilizando a seguinte equação:

$$\frac{C_{pa}}{C_{psaf}} = \frac{M_{saf}}{M_a} \frac{y}{y'} \quad (3.2)$$

onde

C_{pa} = calor específico da amostra (kJ/g°C);

C_{psaf} = calor específico da safira (kJ/g°C), obtido através da literatura, (TOULOUKIAN & BUYCO, 1970).

M_a = massa da amostra (kg);

M_{saf} = massa da safira (kg).

y = taxa de fluxo de calor da amostra (J/s)

y' = taxa de fluxo de calor da safira (J/s).

As taxas y e y' das amostras e da safira, respectivamente, foram determinadas

medindo-se a deflecção com respeito a linha base obtida a partir dos termogramas.

3.2.7.2. Temperatura de Início de Fusão, Temperatura de Pico de Fusão, Entalpia de Fusão e Conteúdo de Água não Congelada.

A figura 3.3 mostra um esquema de um termograma. Nesta figura é possível visualizar a linha base não linear do tipo sigmoidal que é necessária para determinar a temperatura inicial de fusão e a entalpia de fusão. A entalpia de fusão (ΔH_f) foi determinada integrando a área sob o pico de taxa de calor em relação a temperatura na região de mudança de fase. A temperatura de pico de fusão (T_{pf}) foi definida como a temperatura em que a taxa de fusão é máxima, isto acontece quando a tangente da curva vale zero. A temperatura inicial de fusão (T_{if}) é definida como o ponto de intersecção entre a máxima inclinação e a linha base dos termogramas, sendo que a linha base do tipo sigmoidal foi utilizada pelo programa do equipamento, por ser a que mais se adequava a linha base do experimento.

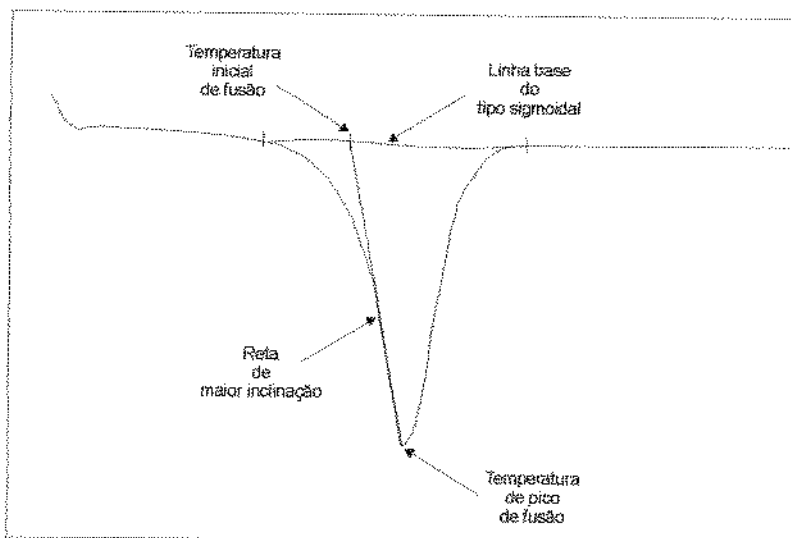


Figura 3.3. Esquema de um termograma.

Até o início da fusão, o conteúdo de água não congelada (UFW) foi calculado pela equação (3.3).

$$UFW = X_{wa} - \frac{\Delta H_{fa}}{\Delta H_{fw}} \quad (3.3)$$

onde

UFW= conteúdo de água não congelada;

X_{wa} = fração de água na amostra ;

ΔH_{fa} = entalpia de fusão da amostra (kJ/kg);

ΔH_{fw} = entalpia de fusão da água (kJ/kg).

O valor da ΔH_{fw} foi obtido através da literatura, como 335 (kJ/kg), (ASHAE, 1985).

3.2.8. Condutividade térmica

A condutividade térmica das amostras de polpa de manga foi calculada através da equação (2.1) que relaciona a difusividade térmica, o calor específico, a densidade e a condutividade térmica.

3.2.9. Modelos de predição da literatura

Alguns modelos são encontrados na literatura para predizer a densidade, a difusividade térmica, o calor específico e a condutividade térmica dos alimentos. Alguns destes modelos foram utilizados para comparar com os valores experimentais obtidos e o critério de avaliação utilizado foi o desvio médio relativo (P):

$$P = \frac{100}{n_e} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(V_e - V_t)}{V_e} \right|$$

(3.4)

onde

P= desvio médio relativo

n_e = número de dados experimentais

V_e= valor experimental

V_t= valor obtido pelo modelo

Os modelos utilizados para comparar com os dados experimentais da densidade, da difusividade térmica, do calor específico e com o valor calculado da condutividade térmica da polpa de manga estão apresentados nas tabelas 3.1 a 3.4 respectivamente.

Tabela 3.1. Modelos da literatura utilizados para o cálculo da densidade da polpa de manga.

Produto	Fórmula, ρ (kg/m³)	Autor	MODELO
Polpas e sucos de frutas (geral)	$\rho = (1002 + 4,61 B) - 0,460 T + 7,001 \cdot 10^{-3} B T^2 - 9,175 \cdot 10^{-5} T^3$	ALVARADO & ROMERO (1989)	A
Polpa de manga	$\rho = (1087 - 1,064 T + 21,887 \cdot 10^{-3} T^2 - 26,16 \cdot 10^{-5} T^3)$	ALVARADO & ROMERO (1989)	B
Suco de tomate	$\rho = \rho_w X_w + \rho_s X_s$ $\rho_w = 999,89 - 0,06033 T - 0,003671 T^2$ $\rho_s = 1469,3 + 0,5467 T - 0,00695 T^2$	CHOI & OKOS (1983)	C
Solução de açúcar	$\rho = 1098 + 4,26 X_s - 0,049 (T + 273)$	Kubota et al. (1980) citado por CHOI & OKOS (1986)	D

Tabela 3.2. Modelos da literatura utilizados para o cálculo do calor específico da polpa de manga.

Geral	$C_p = 0,837 + 3,349 X_w$	Siebel (1892) citado por MONSENIN (1980)	A_{Cp}
Geral	$C_p = 1,675 + 2,512 X_w$	DICKERSON (1968)	B_{Cp}
Suco de laranja	$C_p = 4,1713 - 0,02779 B$	VIEIRA (1996)	C_{Cp}
Geral	$C_p = 1,465 + 2,721 X_w$	LAMB (1976)	D_{Cp}
Sucos e xaropes	$C_p = 4,1253 - 0,024804 B + 6,7 \cdot 10^{-5} T + 1,8691 \cdot 10^{-5} T - 9,271 \cdot 10^{-6} T^2$	Watson (1989) citado por PEACOCK (1995)	E_{Cp}

Tabela 3.3. Modelos da literatura utilizados para o cálculo da condutividade térmica da polpa de manga.

Produto	Fórmula, K (W/m °C)	Autor	Modelo
Suco de frutas	$K = [326,58 + 1,0412 T - 0,00337 T^2] [0,46 + 0,54 X_w] 1,73 \cdot 10^{-3}$	Riedel (1949) citado por CHOI & OKOS (1986)	A_K
Suco de tomate	$K = K_w X_w + K_s X_s$ $K_w = 0,5747 + 0,001723 T - 0,000006722 T^2$ $K_s = 0,05998 + 0,001593 T + 0,00000163 T^2$	CHOI & OKOS (1983)	B_K
Materiais biológicos	$K = 0,056 + 0,57 X_w$	SPELLS (1960)	C_K

Tabela 3.4. Modelos da literatura utilizados para o cálculo da difusividade térmica da polpa de manga.

Produto	Fórmula, α (m ² / s)	Autor	modelo
Alimentos em geral	$\alpha = 0,088 \cdot 10^{-6} + (\alpha_w - 0,088 \cdot 10^{-6}) X_w$	RIEDEL (1969) citado por CHOI & OKOS (1986)	A _{DT}
Alimentos em geral	$\alpha = [0,057363 X_w + 0,000288 (T+273)] \cdot 10^{-6}$	MARTENS (1980) citado por SINGH (1982)	B _{DT}

4. Resultados e Discussão

4.1. Teste de maturação

Na figura 4.1 podemos verificar todos os valores obtidos da força necessária para uma penetração de 5mm da ponta cilíndrica na manga, conforme item 3.2.1. A força mínima obtida foi de 1847,3 gf e a máxima de 3405,5 gf. A figura 4.2 mostra o valor médio da força aplicada de 2489,9gf.

Estes resultados estabelecem um padrão de maturação para a manga que visualmente já estava madura, padrão este expresso como a força média necessária para que tenhamos uma penetração de 5 mm na manga. Esta maturação corresponde a um produto com 12,7 °Brix.

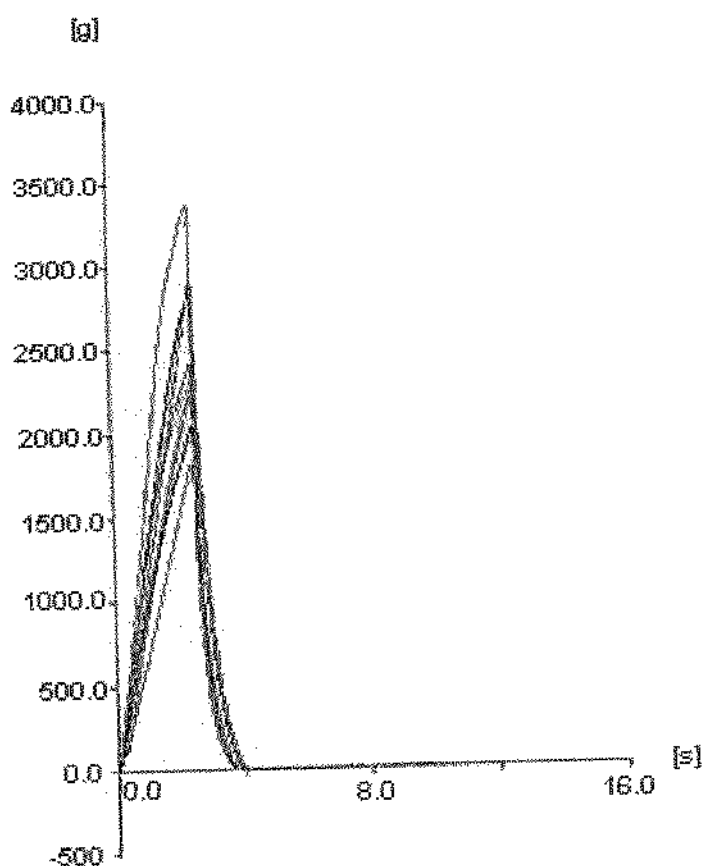


Figura 4.1. Teste de maturação .

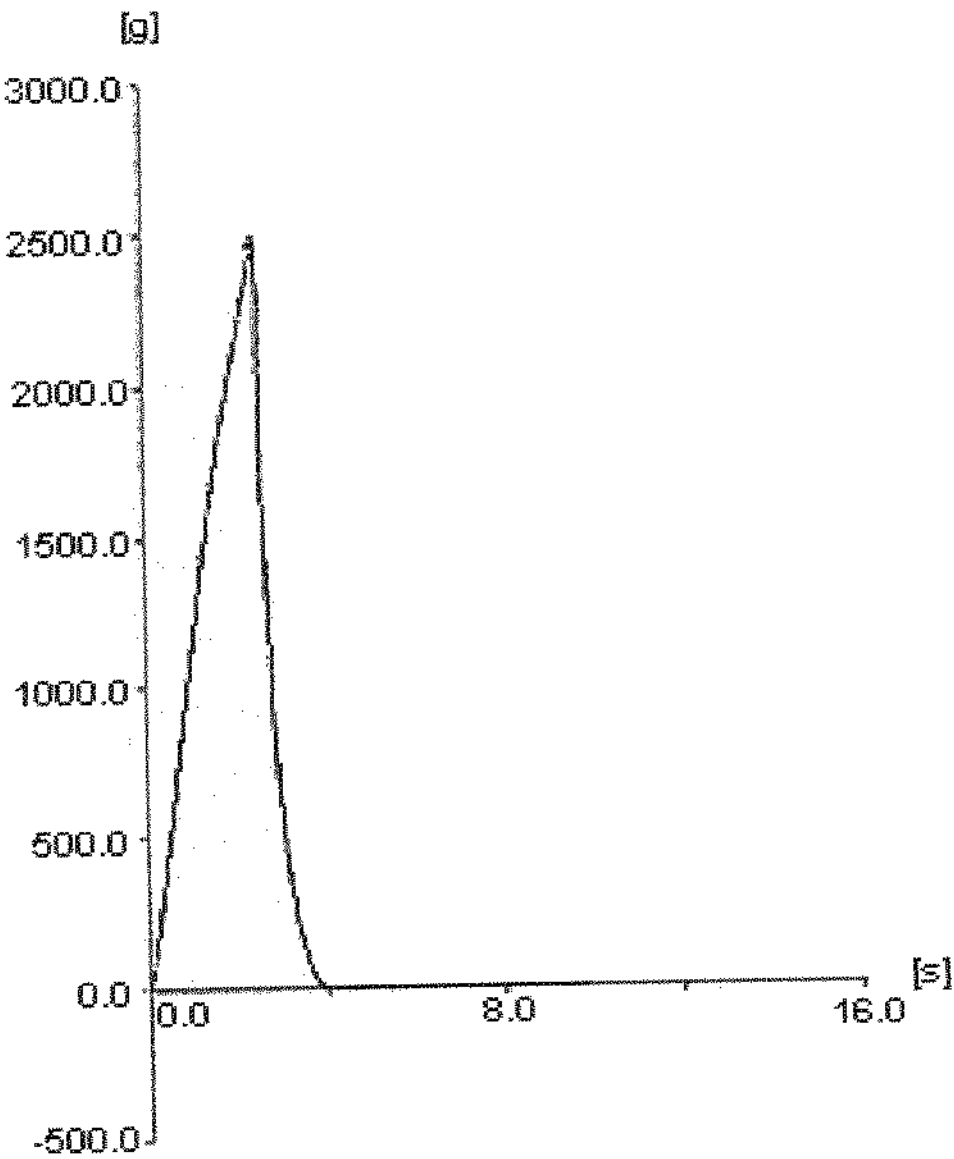


Figura 4.2. Teste de maturação-curva média.

4.2. Caracterização da polpa de manga

Quando se deseja comparar dados termofísicos é muito importante que se conheça a composição química do sistema. Dependendo da época, local e estado de maturação, a manga pode apresentar uma grande variação na sua composição.

A tabela 4.1 mostra a caracterização química obtida das amostras de polpa de manga integral, peneirada, centrifugada e concentrada, segundo os itens (3.2.1.1 a 3.2.1.7).

Tabela 4.1 - Caracterização química da polpa de manga

	Integral	peneirada	centrifugada	concentrada
pH	4,36	—	—	—
Concentração (°BRIX)	12,7	12,7	12,7	30
Açúcares Totais (%)	7,82	—	—	—
Cinzas (%)	0,276	—	—	—
Acidez Total (% ácido cítrico)	0,279	—	—	—
Umidade (%)	87,03	87,05	87,75	68,38
Pectina (% pectato de cálcio)	0,767	—	—	—
Sólidos solúveis (%)	12,04	12,23	12,25	29,52
Sólidos Insolúveis (%)	0,936	0,718	0	2,103

Observando a tabela 4.1, verificamos que os valores encontrados para o pH, °Brix, açúcares totais, acidez e umidade estão de acordo com a literatura. Segundo BOTREL (1994), o pH da manga varia de 3,0 a 4,7 e acidez da manga situa-se entre 0,13 a 0,26 % de ácido cítrico. DALMO et al. (1988) encontrou um valor de 4,24 para o pH e 0,21 para a acidez da manga Tommy Atkins. O teor de sólidos solúveis na manga varia de 6,65 a 21,9 °Brix, dependendo da variedade e estágio de maturação do fruto (NATIVIDAD, 1987). O teor de sólidos solúveis da manga de variedade Tommy Atkins, segundo DALMO et al. (1988) é de 13,9 °Brix.

O teor de pectina indica consistência ou textura de um produto e na manga ele é de especial interesse para a conservação e processamento industrial, variando de 0,5 a 1 % (ROE & BRUEMMER, 1981) o que está de acordo com o encontrado na tabela 4.1

A quantidade de açúcares totais da manga de variedade Julies foi de 3,74 a 11,64 %, dependendo do estado de maturação (INYANG & AGBO, 1995).

4.3. Microscopia

Observa-se na figura 4.6 que a amostra centrifugada não apresenta paredes celulares, apresentando apenas material no interior da célula.

Na amostra concentrada, figura 4.3, observa-se uma grande densidade de células. Nos materiais integral (12,7 ° Brix) e peneirado (malha=0,149 mm, 12,7° Brix) é possível visualizar as paredes celulares contendo algum material. Pode-se observar ainda que há uma diminuição progressiva da quantidade de paredes celulares nestas amostras e são nestas paredes celulares que ocorrem a maior quantidade de fibras, figuras (4.3) a (4.6). Estas observações estão de acordo com os resultados obtidos na determinação dos sólidos insolúveis (item 4.1), onde a polpa concentrada possui (2,103%), a polpa integral (0,936 %), a polpa peneirada (0,718%) e a polpa centrifugada (0%) de sólidos insolúveis.

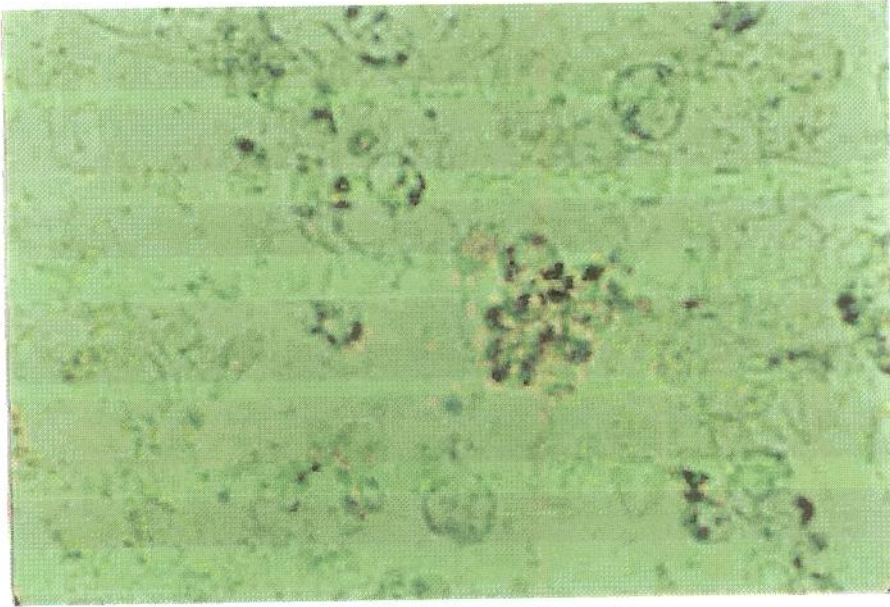


Figura 4.3 - Microscopia da Polpa de manga concentrada (30°Brix)-aumento de 40 vezes.

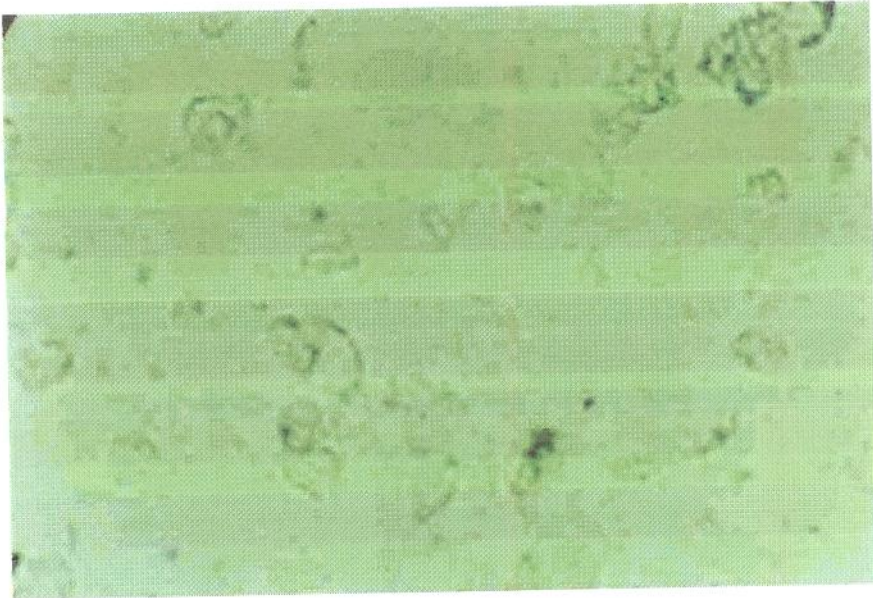


Figura 4.4 - Microscopia da Polpa de manga integral (12,7 °Brix - malha=1.8mm)- aumento de 40 vezes.

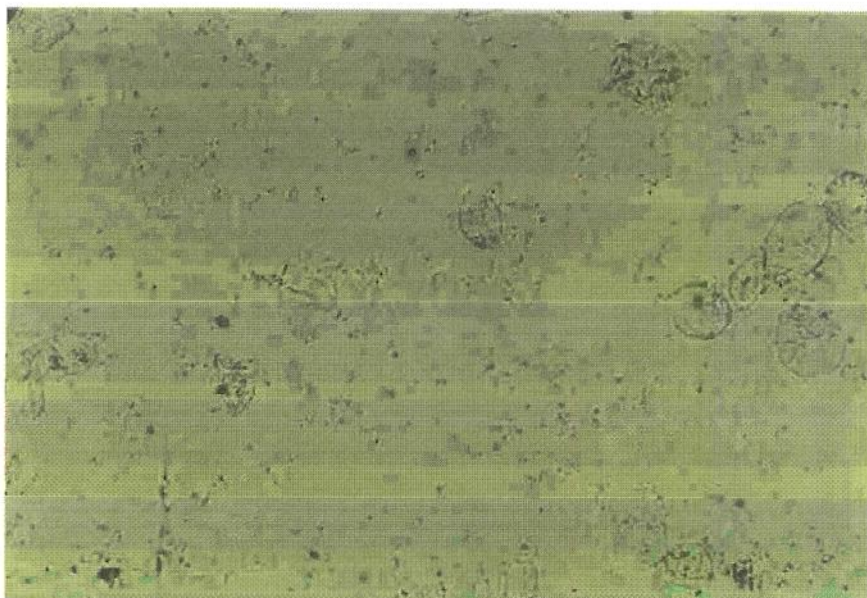


Figura 4.5 Microscopia da Polpa de manga Peneirada ($12,7^{\circ}\text{Brix}$ -malha=0,149mm)-
aumento de 40 vezes.



Figura 4.6. - Microscopia da Polpa de manga centrifugada ($12,7^{\circ}\text{Brix}$)-aumento de 500
vezes.

4.4. Densidade

Dados de densidade são essenciais no projeto de equipamentos de processo, como bombas, trocadores de calor, evaporadores e misturadores, e no entanto dados para frutas tropicais são escassos, daí a importância em determiná-los.

A figura 4.7 mostra os dados experimentais das amostras de polpa de manga em relação a temperatura.

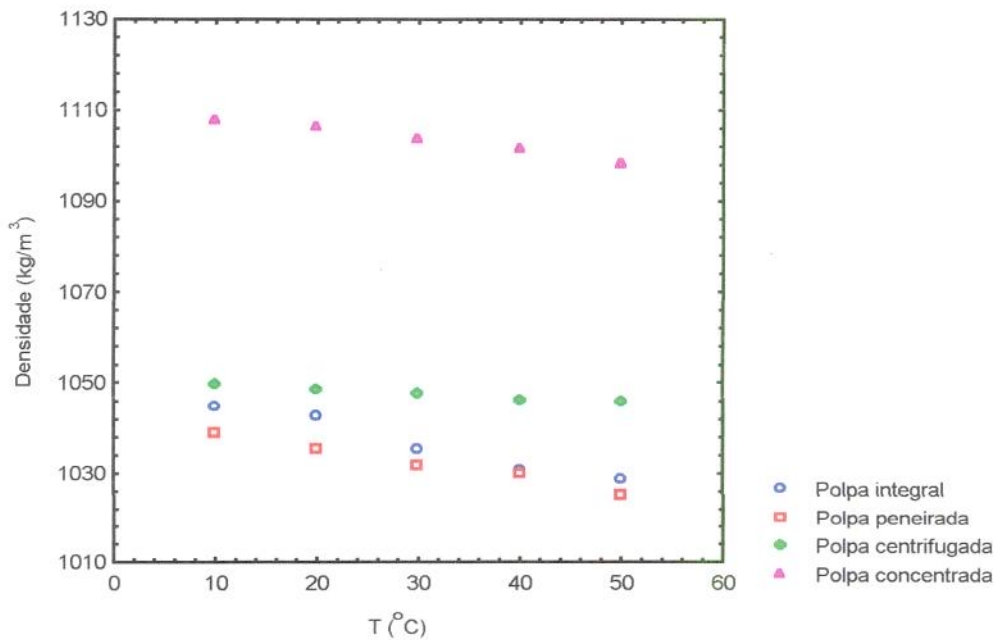


Figura 4.7 – Dados experimentais da densidade da polpa de manga integral, peneirada, centrifugada e concentrada em função da temperatura.

Na figura 4.7 verificamos que polpa centrifugada apresenta um comportamento diferente, da polpa integral e peneirada, apresentando um ângulo de inclinação menor, isto é, o comportamento da manga centrifugada se assemelha ao da água que possui uma variação bem pequena com a temperatura.

As figuras 4.8 a 4.11 mostram os valores experimentais da densidade das polpas

de manga e de alguns modelos de predição encontrados na literatura, conforme apresentados no item 3.2.9.

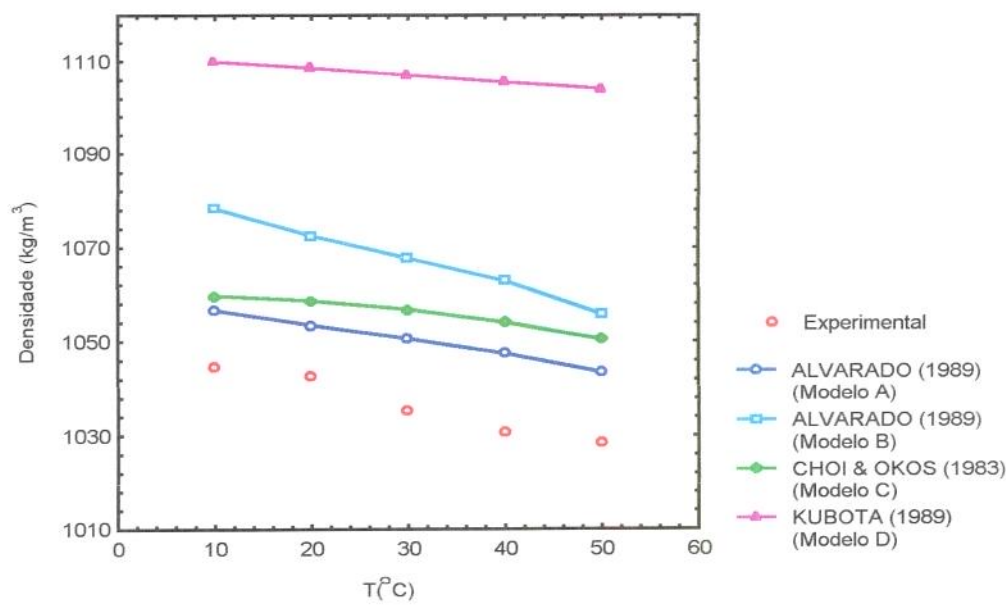


Figura 4.8 – Densidade da polpa de manga integral em função da temperatura, dados experimentais e de modelos da literatura.

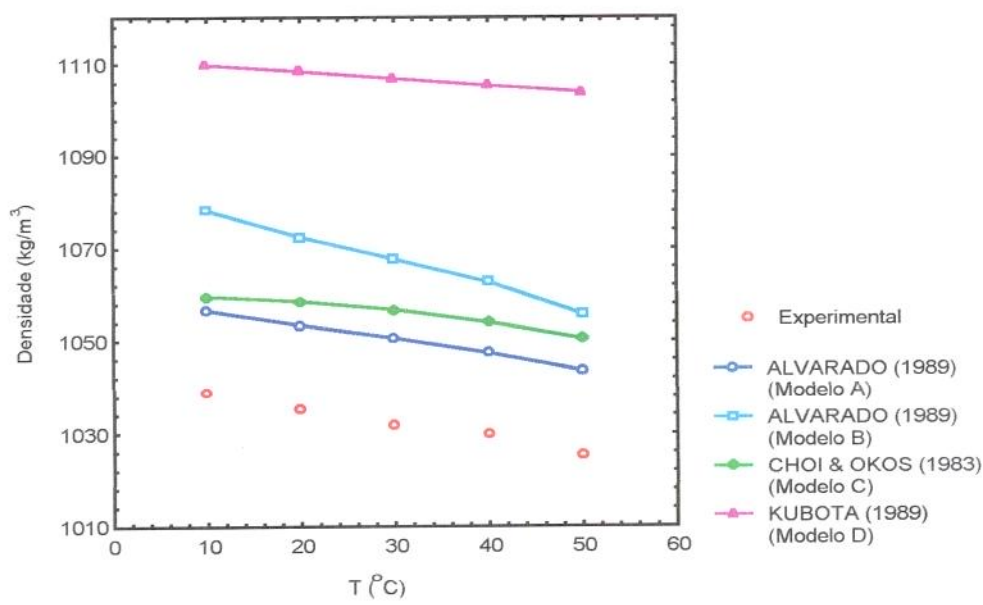


Figura 4.9 - Densidade da polpa de manga peneirada em função da temperatura, dados experimentais e de modelos da literatura.

Observando as figuras 4.8 e 4.9 verificamos os que modelos estão visualmente

afastados dos dados experimentais e que estes modelos seguem a mesma tendência, isto é, a densidade diminui com o aumento da temperatura. O modelo de ALVARADO & ROMERO (1989), modelo B, visualmente segue a mesma inclinação dos dados experimentais.

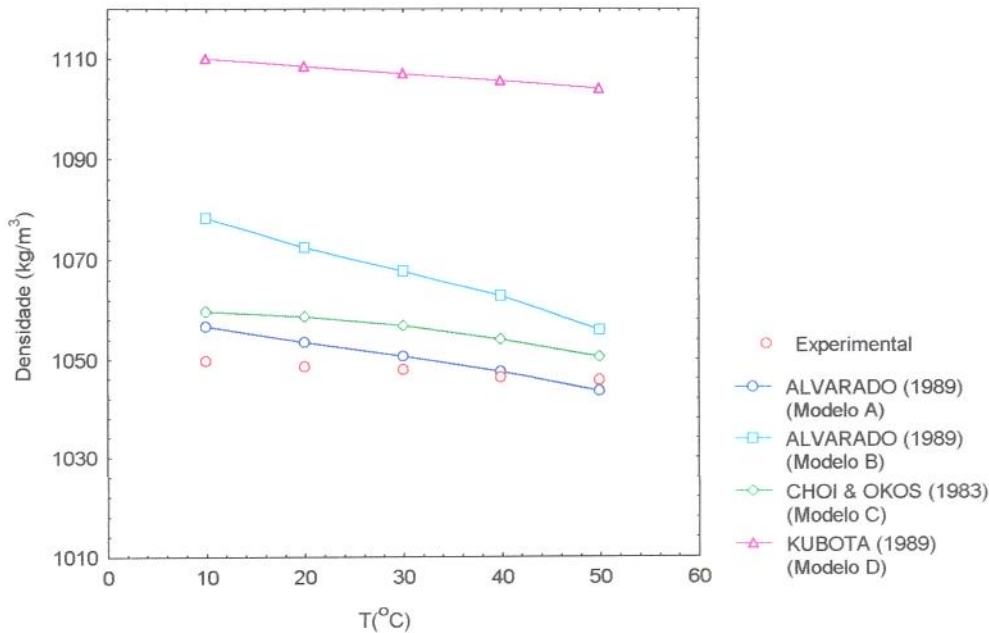


Figura 4.10 - Densidade da polpa de manga centrifugada em função da temperatura, dados experimentais e de modelos da literatura.

Observa-se através da figura 4.10 que os modelos se aproximam mais dos dados experimentais, e que o modelo A de ALVARADO & ROMERO (1989) prediz muito bem na faixa de temperatura de 30 a 50°C e o modelo de CHOI & OKOS (1983) visualmente demonstra produzir o segundo melhor ajuste.

Observando a figura 4.11, verificamos que os modelos também se afastam visualmente dos dados experimentais e que o modelo utilizado por ALVARADO & ROMERO (1989) (modelo B) apresenta valores menores que os experimentais. Isto provavelmente acontece porque o modelo B apresentado para a polpa de manga não considera que a densidade varie com os sólidos solúveis, mas apenas com a

temperatura, o que faz com que o valor calculado com este modelo seja menor.

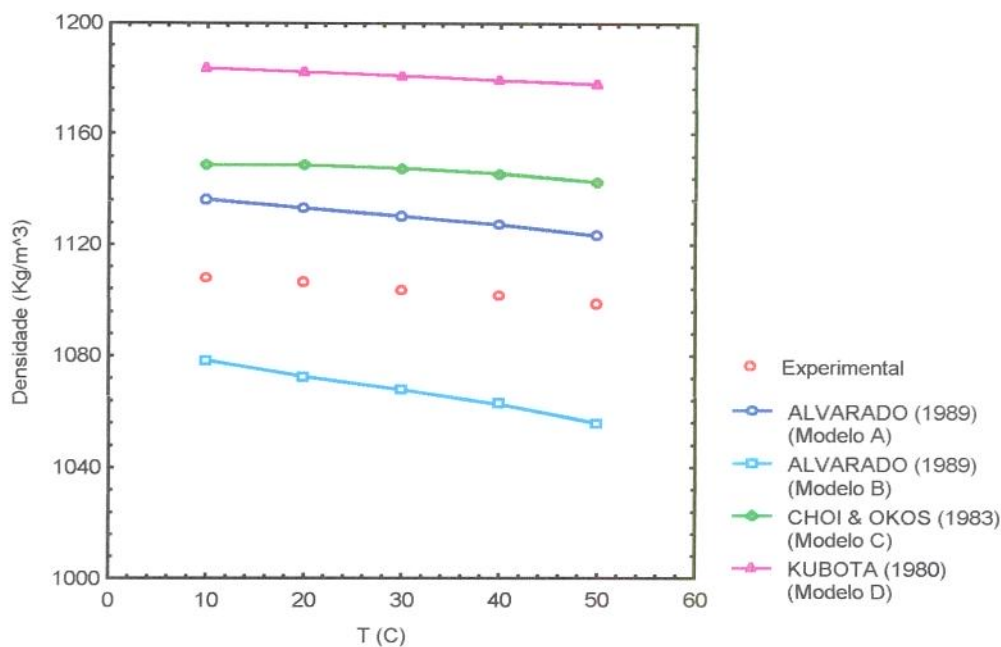


Figura 4.11 - Densidade da polpa de manga concentrada em função da temperatura, dados experimentais e de modelos da literatura.

ALVARADO & ROMERO (1989) determinaram a densidade da polpa de manga a 18° Brix e nas temperaturas de 20, 30,e 40°C e obtiveram 1070, 1063 e 1053 kg/m^3 respectivamente e não especificaram a variedade. Esperava-se portanto que os valores obtidos para as polpas de manga (integral, peneirada e centrifugada) fosse menor, visto que a manga estudada possui um Brix menor, e para a manga concentrada o valor obtido fosse maior e foi o que realmente ocorreu.

Uma análise estatística foi feita calculando os desvios médios relativo (item 3.2.9) entre o valor experimental e o calculado através dos modelos. A tabela 4.2 mostra esses desvios para as polpas de manga e de alguns modelos utilizados.

Tabela 4.2 Desvios médios das polpas de manga em relação aos modelos de ALVARADO & ROMERO, KUBOTA et al e CHOI & OKOS.

T (°C)	Desvios (%)															
	Polpa integral				Polpa peneirada				Polpa centrifugada				Polpa concentrada			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
10	1,12	3,20	1,42	6,23	1,70	3,79	1,99	6,84	0,65	2,73	0,95	5,74	2,60	2,64	3,71	6,87
20	1,03	2,85	1,53	6,31	1,74	3,57	2,23	7,05	0,47	2,28	0,96	5,72	2,43	3,06	3,82	6,86
30	1,48	2,87	2,07	6,93	1,84	3,50	2,43	7,31	0,26	1,90	0,84	5,64	2,42	3,25	3,98	6,98
40	1,61	3,08	2,24	7,23	1,66	3,14	2,30	7,29	0,11	1,56	0,74	5,65	2,34	3,51	4,00	7,05
50	1,26	2,44	1,93	7,12	1,77	2,97	2,95	7,66	1,26	2,44	1,93	7,12	2,27	3,87	4,03	7,22

onde A= ALVARADO & ROMERO (1989) – para alimentos em geral.

B= ALVARADO & ROMERO (1989) – para a polpa de manga.

C= CHOI & OKOS (1983)-para o suco de tomate.

D= Kubota et al. (1980) citado por CHOI & OKOS (1986)- para solução de açúcar.

Observando a tabela 4.2, verificamos que o ajuste dado pelo modelo de Kubota et al. (1980) (D) apresentou o maior desvio para todas as amostras (polpa integral, peneirada, centrifugada e concentrada) com valores variando entre 5,64 e 7,66%. O modelo para alimentos em geral de ALVARADO & ROMERO (1989) (A) e o modelo de CHOI & OKOS (1983) (C), foram os que mostraram os menores desvios para as polpas de manga, isto se deve ao fato destes modelos levarem em consideração também a temperatura além da concentração de sólidos , fazendo com que o erro na determinação da densidade seja menor. Em geral os modelos conseguiram predizer melhor a baixas concentrações de sólidos solúveis.

Os resultados da tabela 4.2 mostram a validação dos modelos utilizados e caso não se disponha de dados para a polpa de manga e não seja exigida uma grande precisão, esses modelos podem ser utilizados para predizer o valor de densidade.

Numericamente, um desvio médio relativo (P) da ordem de 5% mostra que o modelo consegue predizer bem o comportamento de um dado experimental, isto foi verificado por (LOMAURO,1985). Os modelos utilizados representam o comportamento da polpa de manga com um desvio de no máximo 7%.

Apesar destes modelos representarem razoavelmente os dados de densidade, é interessante propor um modelo baseado nos dados experimentais, para que possa representar com mais precisão a densidade da polpa de manga. Para isto propomos um modelo quadrático que é função da temperatura, onde os valores dos parâmetros a_0 , b_1 e b_2 foram obtidos pelo software STATISTICA 5.0.

A tabela 4.3 mostra os parâmetros do modelo quadrático proposto para o ajuste dos dados experimentais das polpas de manga, o coeficiente de correlação (R) e o desvio médio relativo (P). Podemos observar que o modelo quadrático apresentou um bom ajuste aos dados experimentais das polpas de manga com um coeficiente de correlação superior a 0,98 e um desvio médio relativo baixo, no máximo 0,1%.

Tabela 4.3 - Parâmetros do modelo quadrático para a densidade de polpa de manga.

Amostras	$\rho = (a_0 + b_1 T + b_2 T^2) \text{ (kg/m}^3\text{)}$			R	P(%)
	a_0	b_1	b_2		
Integral	1050,98	-0,5600	0,002000	0,983	0,102
Peneirada	1041,90	-0,3113	-0,000271	0,994	0,041
Centrifugada	1050,68	-0,0994	-0,000143	0,995	0,015
Concentrada	1108,91	-0,1001	-0,002214	0,998	0,0137

4.5. Difusividade Térmica

Na literatura existem poucos dados publicados de difusividade térmica de polpa de frutas. Entre os trabalhos publicados podemos citar HAYES (1984) que trabalhou com polpa de mamão, BROWMIK & HAYAKAWA (1979) com polpas de tomate e maçã, SILVA (1997) com polpa de abacaxi, RIEDEL (1969) com polpas de morango e banana. A difusividade térmica, das polpas nestes trabalhos, variou entre 1 e 2 10⁻⁷ m²/s.

As Figuras 4.12 a 4.15 mostram os ensaios realizados para a determinação da difusividade térmica das amostras de polpa de manga utilizando o método de DICKERSON (1965), (item 3.2.6) para um intervalo de temperatura entre 25 e 50°C, e os resultados obtidos são mostrados na tabela 4.5.

A tabela 4.4 mostra os parâmetros da regressão linear T_s versus tempo utilizadas para determinar a constante de aquecimento (A) que é o coeficiente angular da reta.

Tabela 4.4. Parâmetros da regressão linear T_s versus tempo

Amostra de polpa de manga	Equação linear	R
Polpa integral	T _s =23,7+0,50 t	0,999
Polpa centrifugada	T _s =23,9+0,40 t	0,999
Polpa peneirada	T _s =24,4+0,39 t	0,999
Polpa concentrada	T _s =25,3+0,39 t	0,999

A tabela 4.5 mostra os parâmetros (A) e (T_s-T_c) utilizados para o cálculo da difusividade térmica, conforme equação 2.9. O parâmetro (A) foi obtido da tabela 4.4 e o (T_s-T_c) a partir da equação 3.1.

Tabela 4.5 . Difusividade térmica das polpas de manga

Amostra de polpa de manga	A (°C/min)	T _s -T _c (°C)	Difusividade Térmica ($\times 10^7$ m ² /s)
Polpa integral	0,50	8,9	1,41 $\pm$ 0,05
Polpa centrifugada	0,40	7,1	1,39 $\pm$ 0,08
Polpa peneirada	0,39	7,0	1,38 $\pm$ 0,03
Polpa concentrada	0,39	7,6	1,28 $\pm$ 0,03

Na tabela 4.5 podemos verificar que a difusividade térmica não apresentou mudança significativa quando diminuimos o teor de sólidos insolúveis, mas quando mudamos o teor de sólidos solúveis percebemos que houve uma diminuição da difusividade térmica (polpa concentrada).

ALVARADO (1994) determinou a difusividade térmica da polpa de tomate com 87,6 % de umidade e encontrou um valor de $1,38 \times 10^{-7}$ m²/s e para a polpa de goiaba com 86,4% de umidade um valor de $1,4 \times 10^{-7}$ m²/s que são valores próximos aos encontrado para as polpas de manga integral, peneirada e centrifugada.

Utilizamos dois modelos da literatura, modelos de Riedel (1969) (A_{DT}) e Martens (B_{DT}) para calcular a difusividade térmica das polpas de manga e comparamos com os dados experimentais usando como critério o desvio médio relativo (P). A tabela 4.6 mostra esses desvios e os valores calculados com os modelos.

Tabela 4.6 :Valores da difusividade térmica das polpas de manga calculados com os modelos de RIEDEL e MARTENS e os desvios médios relativo.

Amostra de polpa de manga	A_{DT}		B_{DT}	
	α (10^7 m ² /s)	P (%)	α (10^7 m ² /s)	P (%)
Polpa integral	1,42	3,77	1,40	3,25
Polpa centrifugada	1,42	6,02	1,40	5,49
Polpa peneirada	1,42	3,17	1,40	2,65
Polpa concentrada	1,30	2,49	1,29	2,21

Onde

A_{DT} = RIEDEL (1969)

B_{DT} = MARTENS (1980)

Como observamos na tabela 4.6, o modelo de MARTENS (1980) apresentou um desvio menor do que o proposto por RIEDEL (1969), mas ambos os modelos apresentaram um bom ajuste ao comportamento das polpas de manga, pois o maior desvio verificado foi de 6,02%.

ALVARADO (1994) comparou o modelo de RIEDEL (1969), que é um modelo linear em função da umidade, com polpas de diferentes frutas, e a relação linear não foi satisfatória e isto pode ser explicado pelas diferentes características físicas de cada fruta.

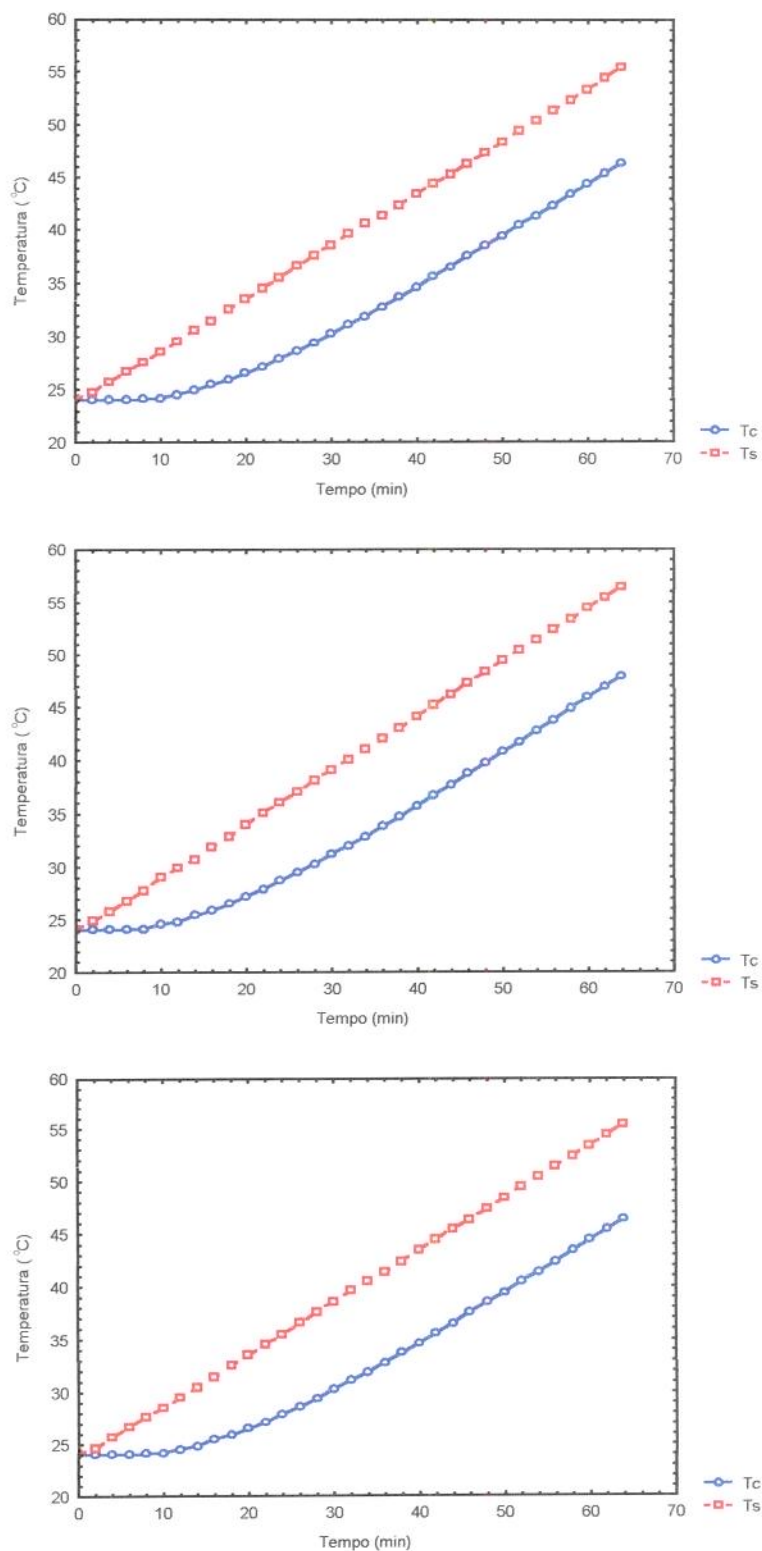


Figura 4.12 - Ensaio para a determinação da difusividade térmica da polpa de manga integral a 12,7 °Brix.

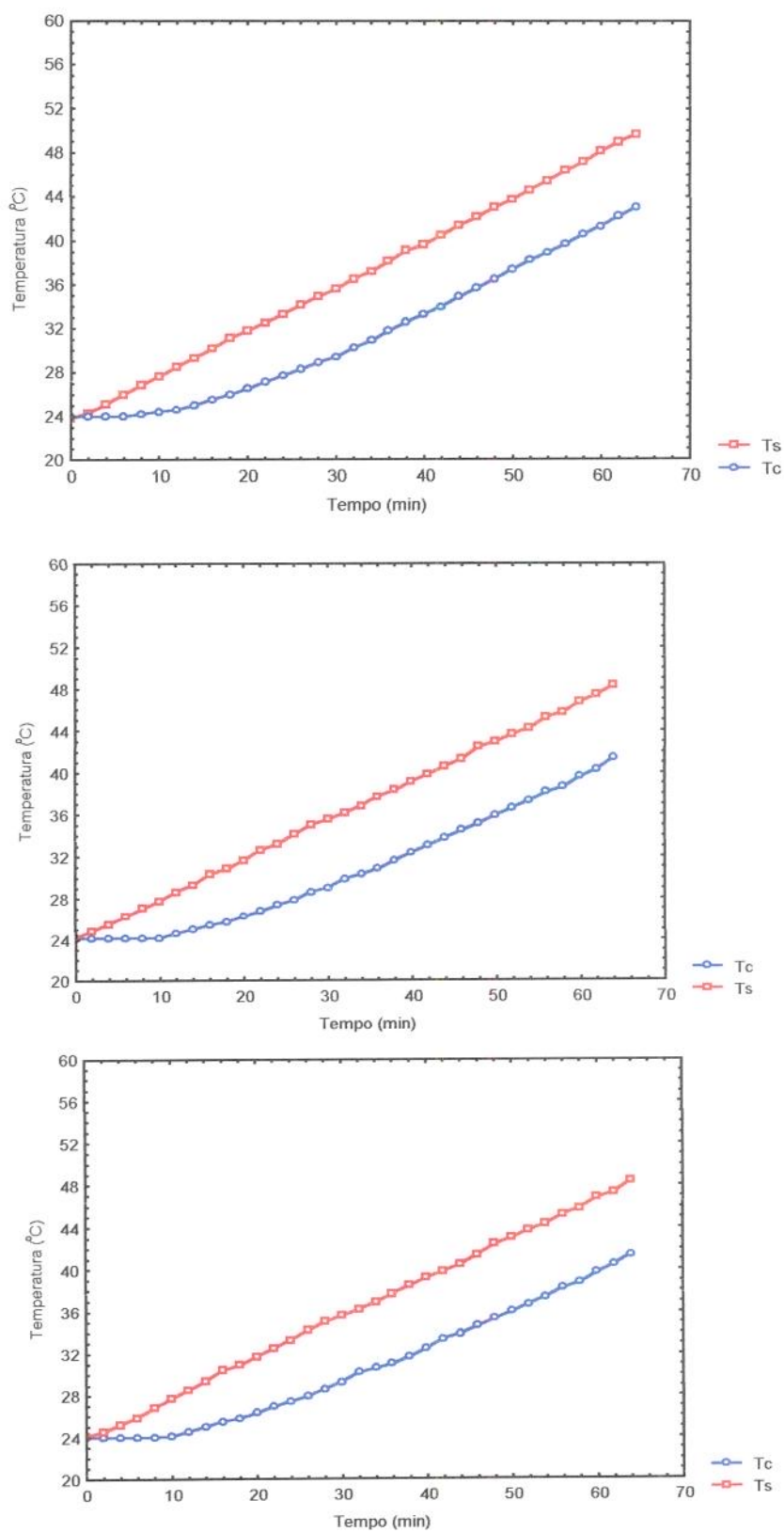


Figura 4.13- Ensaio para a determinação da difusividade térmica da polpa de manga centrifugada a 12,7 °Brix.

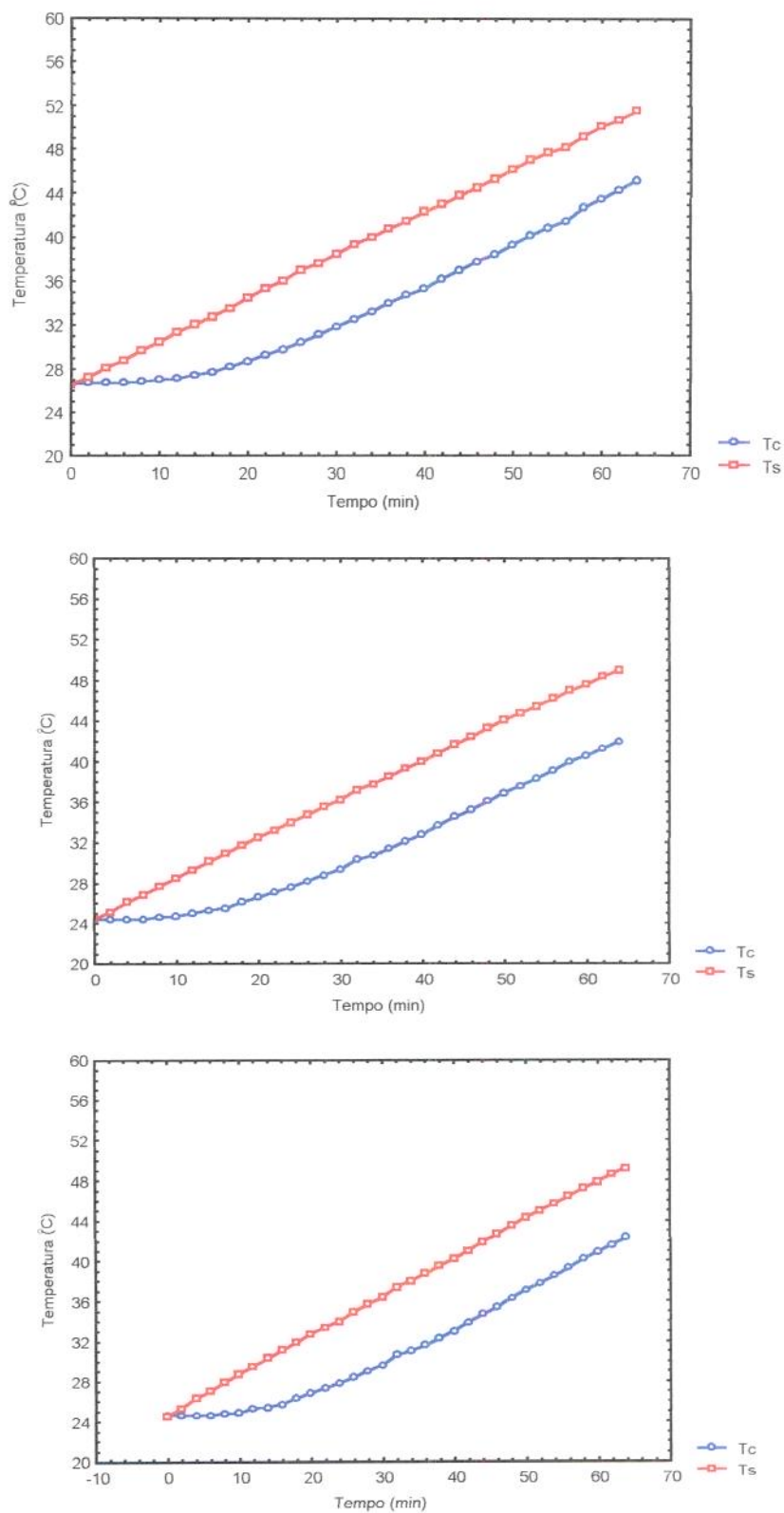


Figura 4.14 - Ensaio para a determinação da difusividade térmica da polpa de manga peneirada (malha=0,149mm) 12,7 °Brix.

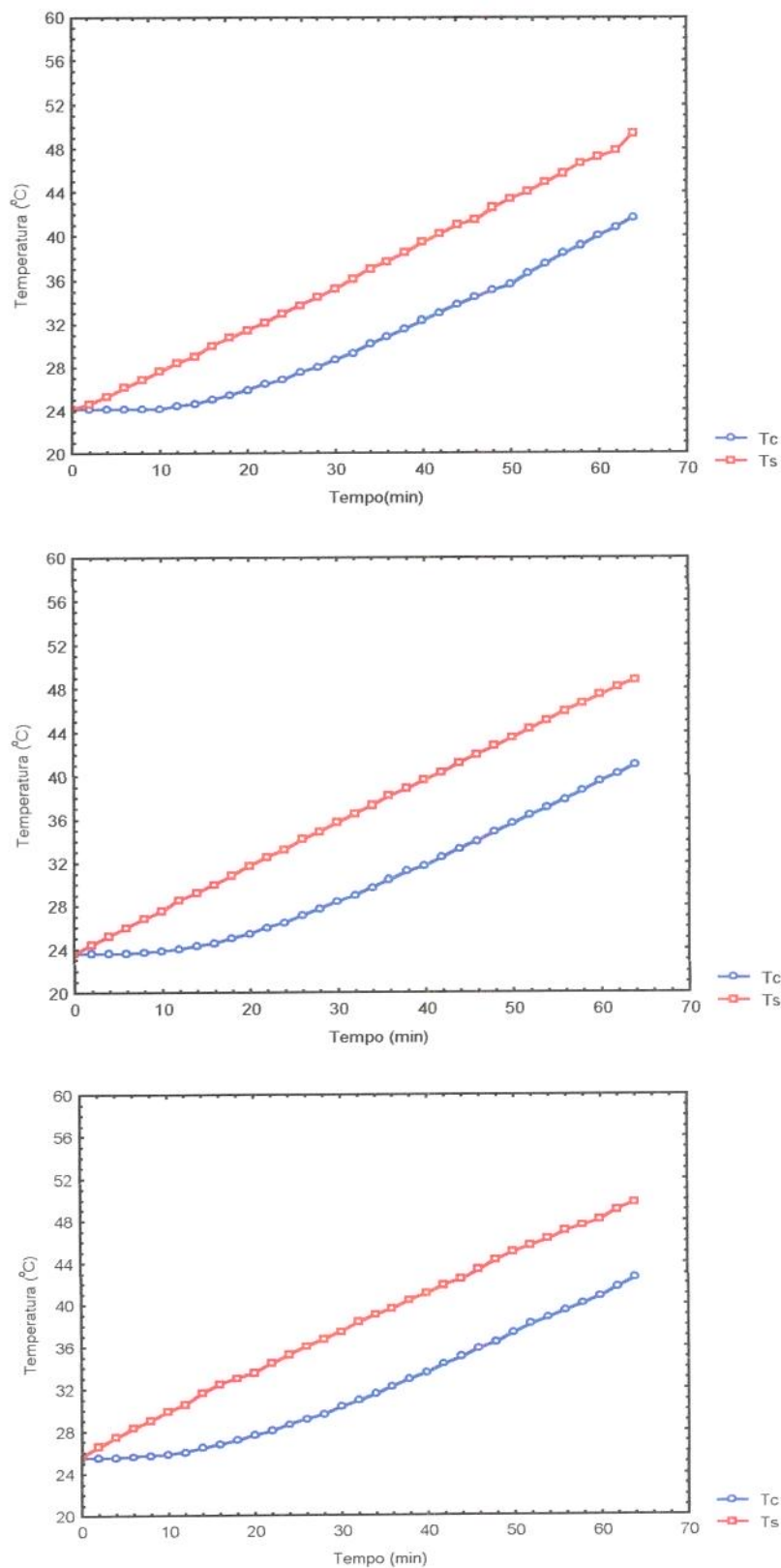


Figura 4.15 - Ensaios para a determinação da difusividade térmica da polpa de manga concentrada a 30 °Brix.

4.6. Propriedades Térmicas no Congelamento

4.6.1. Termogramas

As propriedades físicas associadas ao congelamento foram determinadas utilizando um calorímetro diferencial de varredura (DSC). As figuras 4.16 a 4.19 mostram os termogramas obtidos para a polpa integral (12,7 °Brix, D=1,8 mm), peneirada (12,7 °Brix, D=0,149 mm), centrifugada (12,7 °Brix) e concentrada (30 °Brix).

No DSC assume-se que a amostra atinge o equilíbrio térmico instantaneamente, e isso não é verdade, pois quando ocorre mudança de fase a curva apresentada após este ponto indica a ocorrência de um atraso térmico no equipamento (PHAM, 1996).

Na tabela 4.7 são mostradas os valores médios da temperatura inicial de fusão (T_{if}), da temperatura de pico de fusão (T_{pf}), entalpia de fusão (ΔH_f) e conteúdo de água não congelada (UFW), obtidos dos termogramas.

Tabela 4.7 – Valores médios de temperatura inicial de fusão, temperatura de pico de fusão, entalpia de fusão e conteúdo de água não congelada das amostras de polpa de manga.

Amostra	T_{if} (°C)	T_{pf} (°C)	ΔH_f (kJ/kg)	UFW (%)
Integral	-0,91	4,99	268,2	6,8
Peneirada	-1,09	4,80	249,7	12,5
Centrifugada	-0,54	5,25	286,5	2,2
Concentrada	-4,49	1,92	158,8	20,3

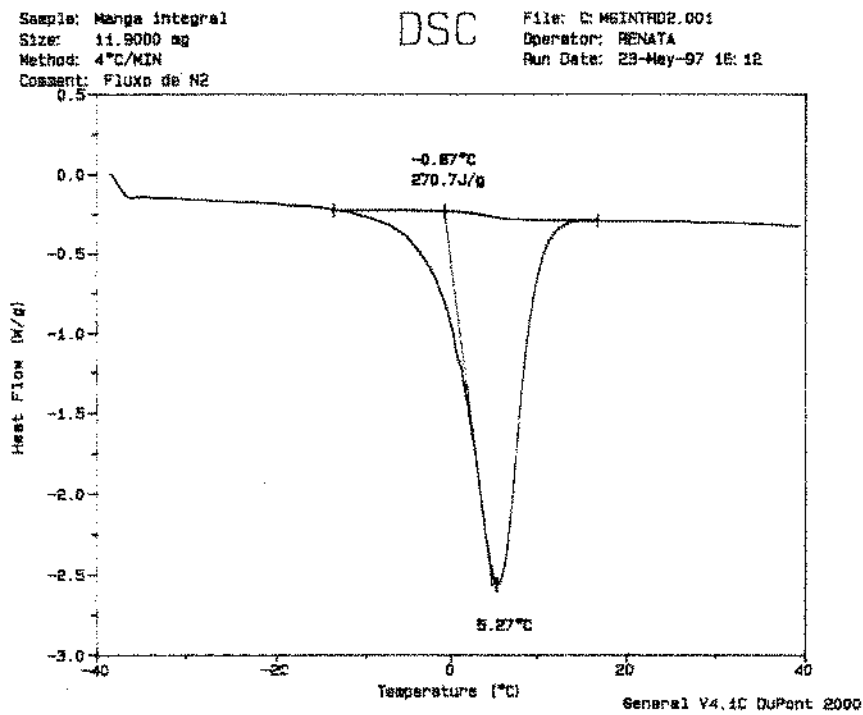
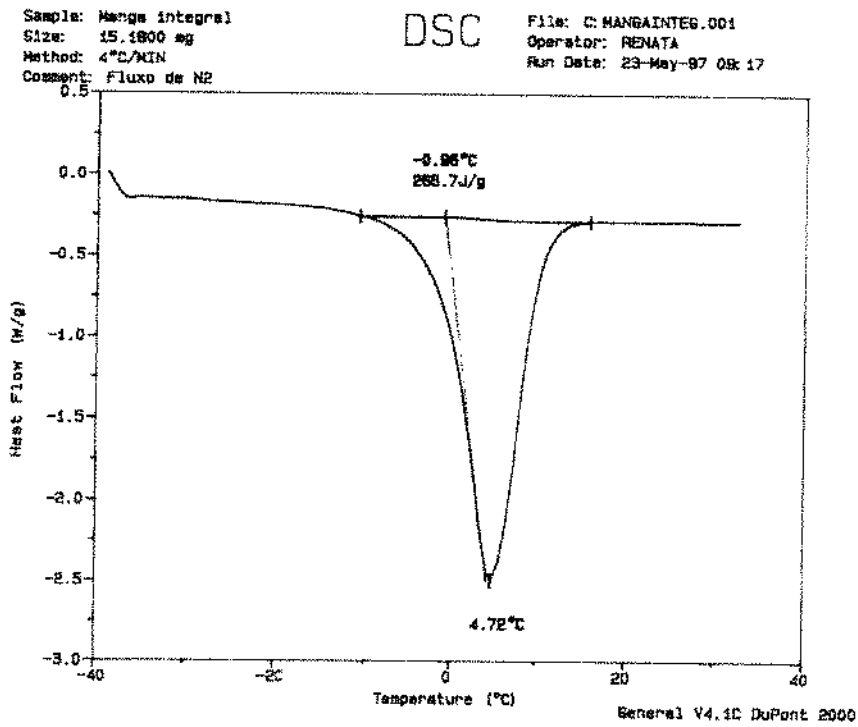


Figura 4.16 Termograma da polpa de manga integral (12.7 Brix- malha=1.8mm).

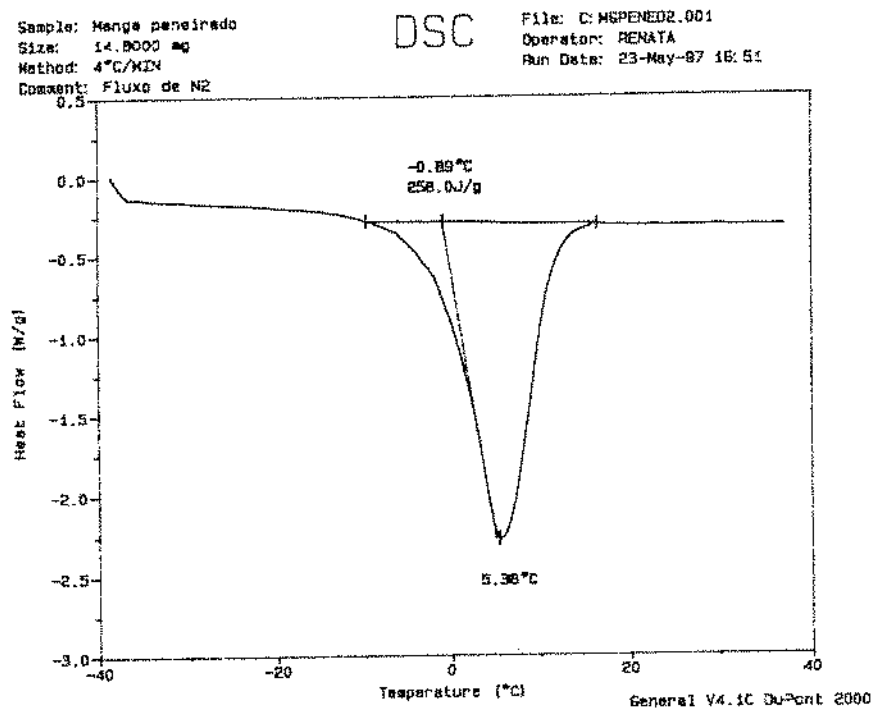
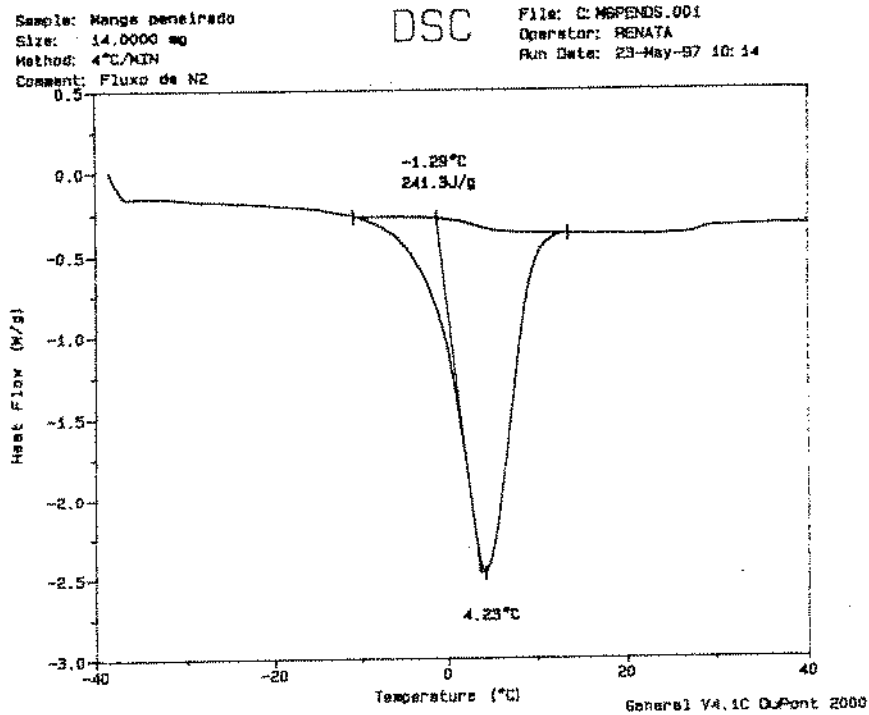


Figura 4.17. Termograma da polpa de manga peneirada (12,7 Brix- malha=0,149mm).

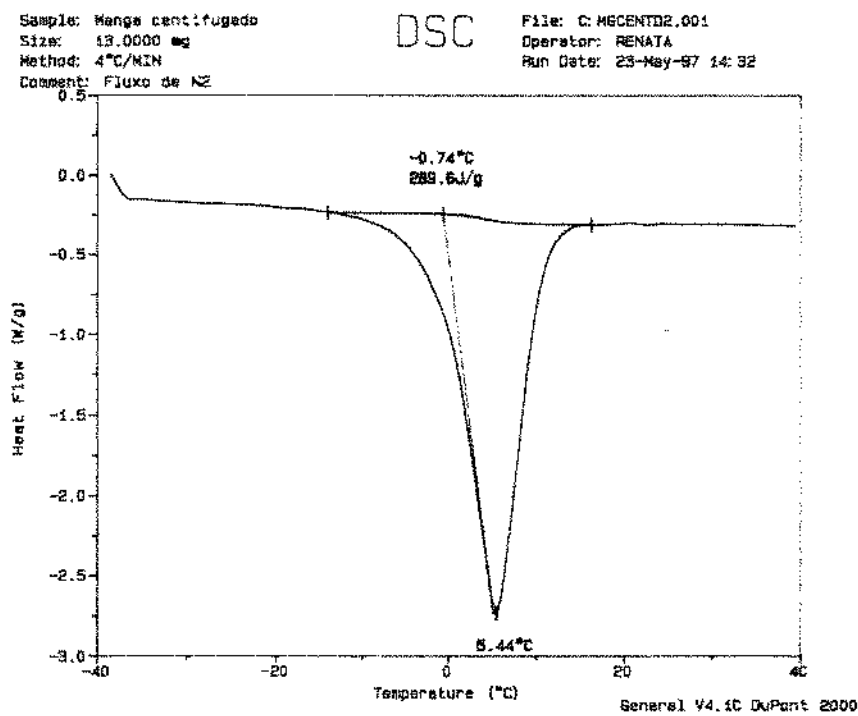
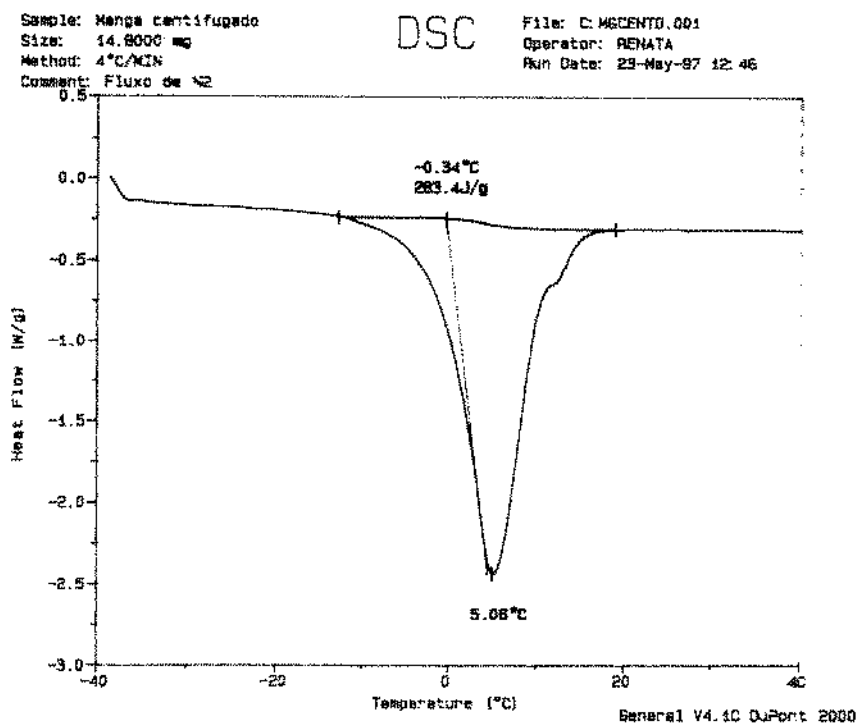


Figura 4.18. Termograma da polpa de manga centrifugada (12,7 Brix).

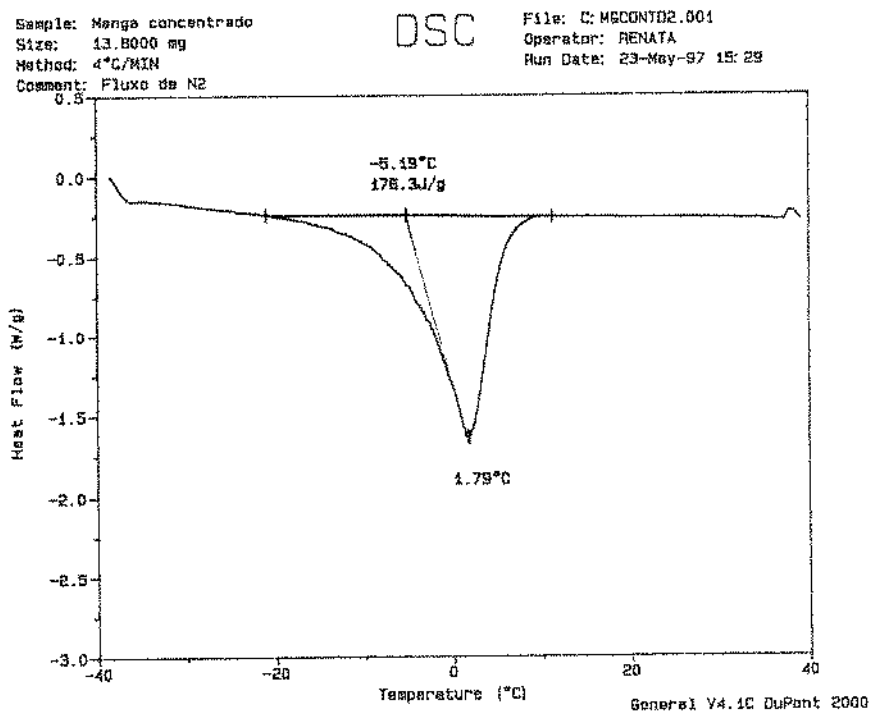
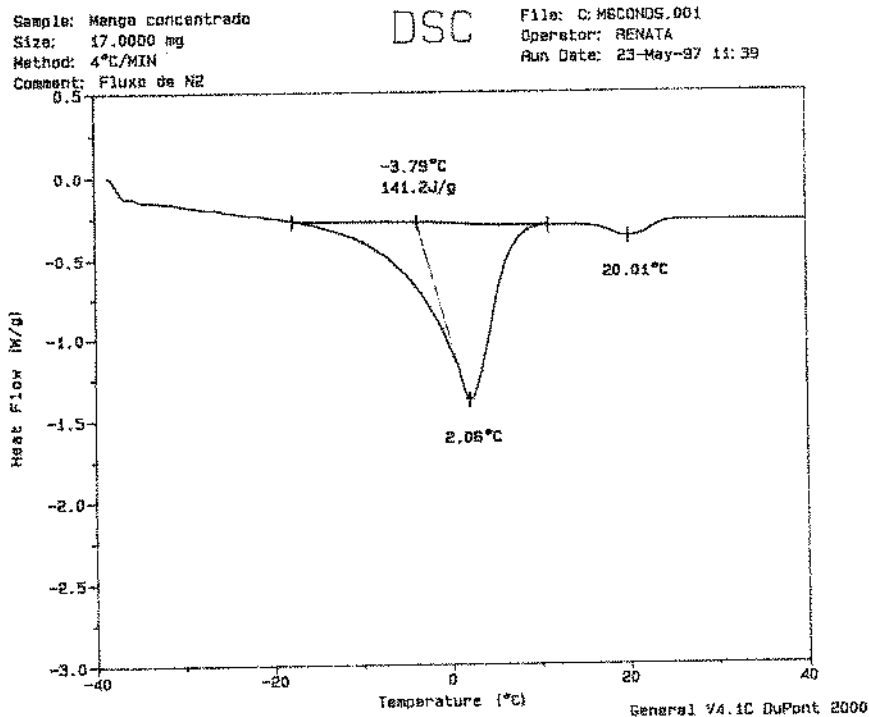


Figura 4.19. Termograma da polpa de manga concentrada (30°Brix).

A temperatura de pico de fusão das polpas de manga integral, peneirada e centrifugada não apresentaram uma variação significativa, como mostrado na tabela 4.7. Para a amostra concentrada temos que a temperatura de pico de fusão foi menor do que das outras amostras que possuem concentração de sólidos solúveis diferente da amostra concentrada. LOVRIC (1987) afirma que a temperatura de pico de fusão diminui quando aumentamos a quantidade de sólidos e que além dos sólidos a composição química afeta a determinação da temperatura de pico de fusão.

A temperatura de início de fusão da polpa concentrada foi menor do que para as outras polpas e isso era esperado porque quanto maior a concentração menor será a temperatura de início de fusão. (GUEGOV, 1981).

LOVRIC (1987) afirma que a entalpia de fusão depende da quantidade de sólidos totais, isto é, diminui quando ela aumenta e isso foi observado quando comparamos a polpa concentrada com as outras polpas.

O conteúdo de água não congelada aumentou com o aumento da concentração de sólidos solúveis, o que era esperado. Nas amostras com diferentes quantidades de sólidos insolúveis, a amostra centrifugada apresentou uma menor quantidade de água não congelada em comparação com a peneirada e a integral, isto pode ter acontecido porque a amostra centrifugada não possui sólidos insolúveis e a água presente na manga centrifugada estaria em sua maior parte na forma de água livre o que facilitaria o congelamento. Quanto as amostras peneirada e integral, verificamos que a quantidade de água não congelada da amostra peneirada é bem maior do que a integral e isso pode ter acontecido porque o equipamento exige uma quantidade muito pequena de amostra e esta amostra não foi representativa.

Para uma completa validação das propriedades termofísicas estudadas, mais ensaios em calorímetro diferencial de varredura devem ser feitos, pois a quantidade de material utilizada é muito pequena e em materiais heterogêneos, como é o caso dos alimentos, seriam necessários mais repetições.

4.6.2. Calor específico aparente

O Calor específico aparente foi calculado como o sugerido por O'NEILL (1966). (item 3.2.7.1).

As figuras 4.20 a 4.23 mostram as curvas obtidas do calor específico aparente para as polpas de manga estudadas.

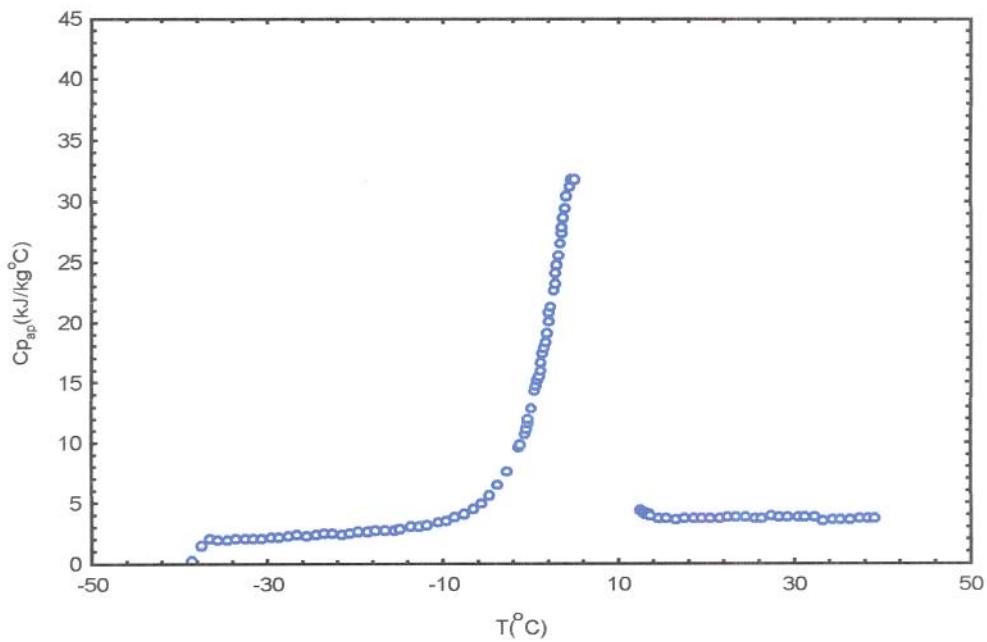


Figura 4.20-Calor específico aparente médio da polpa de manga integral (12,7°Brix-malha=1,8mm).

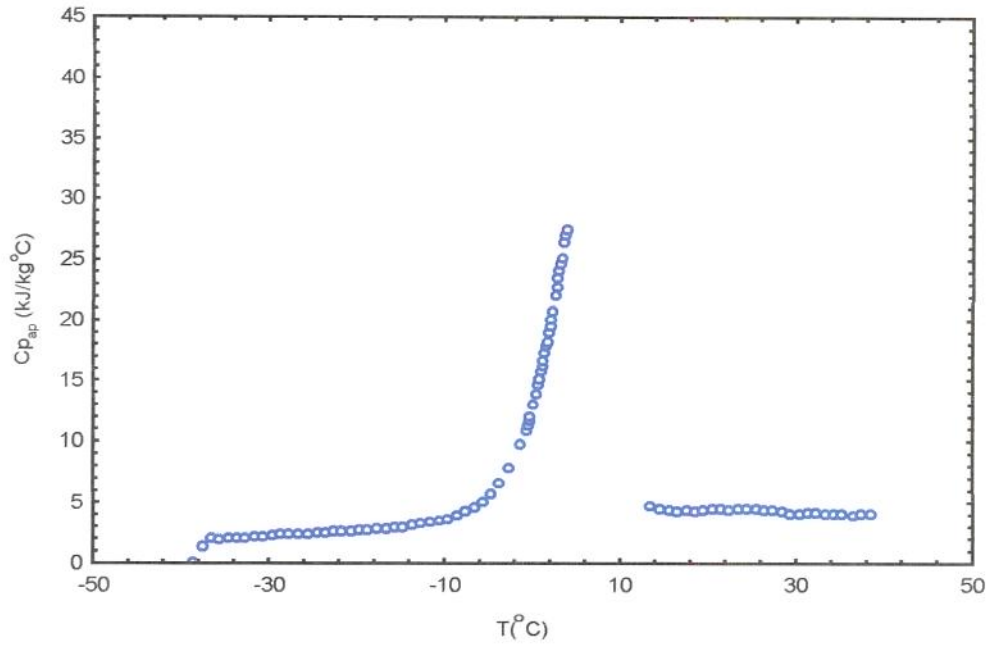


Figura 4.21-Calor específico aparente médio da polpa de manga peneirada (12,7°Brix-malha=0,149mm).

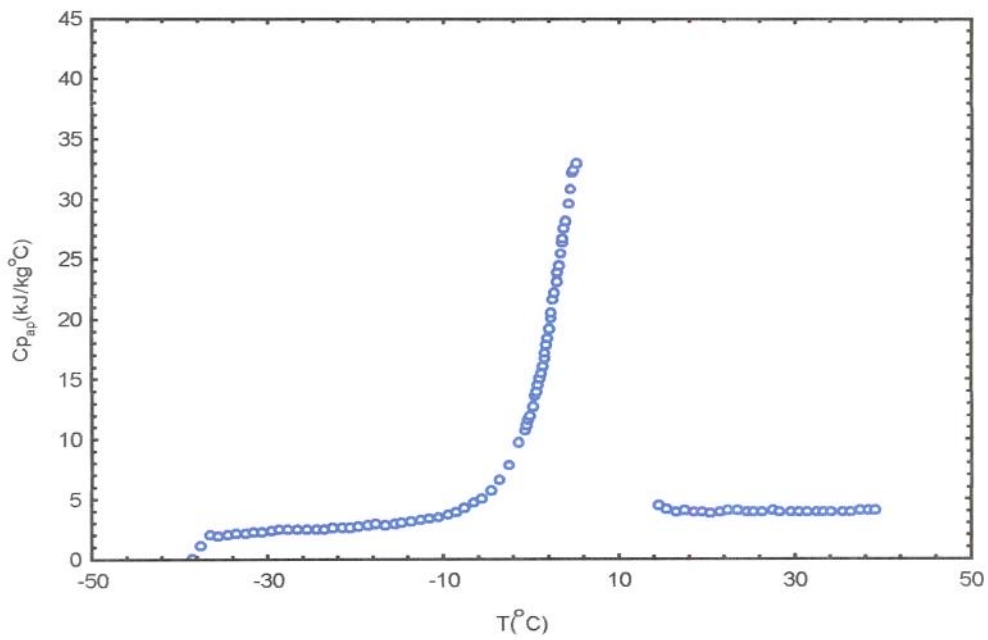


Figura 4.22. Calor específico aparente médio da polpa de manga centrifugada (12,7°Brix).

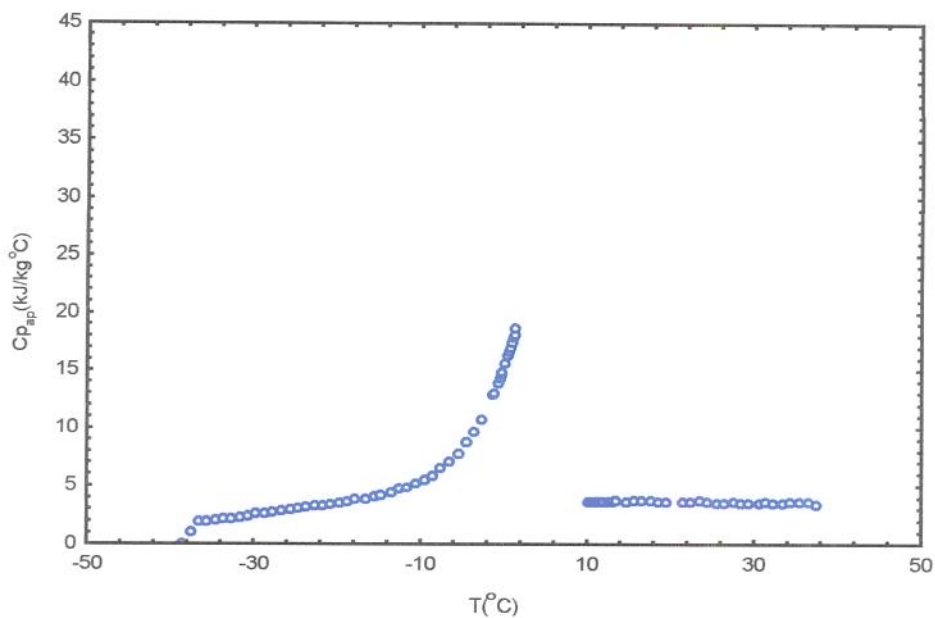


Figura 4.23. Calor específico aparente médio da polpa de manga concentrada (30 °Brix).

Observa-se nas figuras 4.20 a 4.23 que os valores do calor específico aparente na região de mudança de fase são muito maiores do que para a água pura que é de 4,184 kJ/kg°C, isto ocorre porque o cálculo do calor específico engloba o calor sensível e o calor latente de mudança de fase.

A tabela 4.8 mostra os calores específicos médios obtidos antes e depois da mudança de fase. Para o cálculo destas médias foi utilizado um desvio padrão máximo de 0,4%.

Tabela 4.8: Calor específico médio antes e depois do congelamento

Amostra de polpa de manga	Cp (kJ/kg°C)	
	Antes do congelamento	Depois do congelamento
Polpa concentrada	3,59 ±0,26	2,25±0,03
Polpa integral	3,95 ± 0,17	2,36±0,03
Polpa peneirada	4,04 ±0,02	2,49±0,01
Polpa centrifugada	3,96 ±0,01	2,47±0,08

Observa-se que um aumento na concentração de sólidos solúveis (polpa concentrada) foi suficiente para de o C_p antes do congelamento diminuísse de forma significativa em relação as polpas com menor concentração de sólidos solúveis (integral, peneirado e centrifugado). Com relação aos sólidos insolúveis observa-se que a polpa integral (com maior quantidade de sólidos insolúveis) e a centrifugada (sem sólidos insolúveis) não apresentaram uma diferença significativa no C_p antes do congelamento. O mesmo acontecendo para a polpa peneirada (menos sólidos insolúveis que a integral) que apresentou um valor muito próximo da polpa integral e da centrifugada, a diferença está dentro do desvio experimental previsto.

Os resultados encontrados na tabela 4.8 indicam que valores de C_p obtidos após o congelamento são menores do que os encontrados antes do congelamento. HELDMAN (1982) afirma que o C_p para produtos congelados é menor do que para produtos não congelados, isto foi verificado quando ele determinou o C_p aparente de cerejas.

NEVES (1983) determinou o calor específico da manga antes e depois do congelamento e obteve os seguintes valores de 3,76 kJ/kg°C (antes do congelamento) e 1,92 kJ/kg°C (depois do congelamento) para uma manga com 93% de umidade onde não foi especificada a variedade. ALVARADO (1989) para o suco de melancia com 92,6% encontrou um valor de 3,9 kJ/kg°C (antes do congelamento). Os valores encontrados por NEVES (1983) e por ALVARADO (1989) estão próximos ao obtido para as polpas de manga com teores de umidade próximos a 87%.

Para comparar os dados experimentais, foram utilizados alguns modelos da literatura. A tabela 4.9 mostra os desvios médios do C_p das polpas de manga antes do congelamento em relação a alguns modelos descritos na literatura.

Tabela 4.9. Valores de C_p em (kJ/kg°C) antes do congelamento e desvio médio relativo das polpas de manga utilizando os modelos de SIEBEL, DICKERSON, VIEIRA, LAMB e WATSON.

Amostra	A_{CP}		B_{CP}		C_{CP}		D_{CP}		E_{CP}	
	C_p	P(%)	C_p	P(%)	C_p	P (%)	C_p	P (%)	C_p	P (%)
Polpa integral	3,75	5,34	3,86	4,13	3,81	6,96	3,83	4,12	3,88	1,77
Polpa peneirada	3,75	7,39	3,86	4,68	3,81	5,66	3,83	5,17	3,88	3,96
Polpa centrifugada	3,77	5,55	3,88	2,80	3,81	3,78	3,85	2,77	3,88	2,02
Polpa concentrada	3,12	13,4	3,39	5,86	3,34	6,98	3,30	7,94	3,49	2,78

onde,

A_{CP} = SIEBEL (1892) citado por MONSENIN (1980)- para alimentos em geral

B_{CP} = DICKERSON (1968)- para alimentos em geral

C_{CP} = VIEIRA (1996)- para suco de laranja

D_{CP} = LAMB (1976)- para alimentos em geral

E_{CP} = WATSON (1989) citado por PEACOCK (1995)- para sucos e xaropes

Observando a tabela 4.9 podemos verificar que o melhor ajuste foi o com o modelo de Watson (1989) (E) para xaropes e sucos, onde os desvios encontrados foram de no máximo 3,96. No geral os modelos utilizados não predizem bem com altas concentrações de sólidos solúveis, como no caso da manga concentrada. Para a manga centrifugada foi possível obter o menor desvio para todos os modelos.

4.7. Condutividade térmica

A condutividade térmica das amostras de polpa de manga foi calculada através da equação 2.1, utilizando a densidade determinada experimentalmente a 30 °C. O C_p utilizado foi o determinado antes do congelamento, item 4.6.2. A difusividade térmica utilizada foi a determinada no item 4.5.

A tabela 4.10 mostra os valores obtidos para a condutividade térmica e a tabela 4.11 mostra os valores calculados com alguns modelos e os desvios médios relativo

Tabela 4.10. Valores de condutividade térmica das polpas de manga

Amostra de polpa de manga	Condutividade Térmica (W/m°C)
Polpa integral	0,58
Polpa peneirada	0,58
Polpa centrifugada	0,58
Polpa concentrada	0,51

Na tabela 4.10 observamos que os sólidos insolúveis não influenciaram na determinação da condutividade térmica, isto pode ser visto através dos valores obtidos para as polpas integral, peneirada e centrifugada. No entanto os sólidos solúveis mostraram influenciar a condutividade térmica, isto pode ser observado quando comparamos a polpa integral com a concentrada.

Para o suco de laranja com 85,3% de umidade, ALVARADO (1994) encontrou um valor de 0,57 W/m°C, que se aproxima das polpas de manga com teores similares de umidade.

Tabela 4.11- Valores calculados de condutividade térmica e desvio médio relativo das polpas de manga utilizando os modelos de RIEDEL, CHOI & OKOS e SPELLS.

Amostras	A _K		B _K		C _K	
	K (W/m°C)	P(%)	K (W/m°C)	P(%)	K (W/m°C)	P(%)
Polpa integral	0,57	1,72	0,55	5,17	0,55	5,17
Polpa peneirada	0,57	1,72	0,55	5,17	0,55	5,17
Polpa centrifugada	0,57	1,72	0,56	3,44	0,56	3,44
Polpa concentrada	0,50	1,96	0,46	9,80	0,45	11,76

onde

A_K= RIEDEL (1949) - para sucos de fruta

B_K= CHOI & OKOS (1983) - para suco de tomate.

C_K= SPELLS (1960)- para materiais biológicos

Observando a tabela 4.11, verificamos que o modelo de RIEDEL (1949) para sucos de fruta, apresentou um desvio máximo de 1,96%, o que mostra que este modelo consegue predizer bem também a altas concentrações de sólidos solúveis. O modelo de SPELLS (1960) apresentou um desvio de 3,44 a 11,76% e o de CHOI & OKOS (1983) apresentou um desvio na faixa de 3,44 a 9,80%, mostrando que estes modelos conseguem predizer melhor a baixas concentrações de sólidos solúveis.

Apesar dos valores de condutividade térmica calculados estarem coerentes com os dados da literatura, sabe-se que o valor calculado através da equação engloba erros de medidas das outras propriedades.

4.8. Conclusões

Os valores das densidades medidas para as polpas de manga estão coerentes com os citados na literatura. O modelo proposto para prever os valores das densidades das polpas de manga foi um modelo quadrático em função da temperatura. Dos modelos da literatura utilizados, somente o de KUBOTA (1980), apresentou um desvio superior a 7%.

Os valores de difusividade térmica obtidos não mostraram mudança significativa com o teor de sólidos insolúveis, mas mostrou diminuir com o aumento de sólidos solúveis. Os dados experimentais se aproximam aos encontrados na literatura para polpas de outros sucos. Os modelos de RIEDEL (1969) e MARTENS (1980) puderam prever o comportamento da polpa de manga com um desvio máximo de 6,02%.

Dos modelos utilizados para prever a condutividade térmica das polpas de manga, o de RIEDEL (1949) para sucos de fruta prediz bem em todas as concentrações de sólidos utilizadas, com um desvio máximo de 1,96%.

Os sólidos insolúveis não demonstraram influenciar na determinação experimental da densidade, do calor específico e da difusividade térmica.

O Calorímetro Diferencial de Varredura mostrou-se adequado para a determinação do calor específico dos alimentos, visto que os valores encontrados são coerentes com os valores encontrados na literatura para polpas e sucos de fruta. Dos modelos utilizados o que mostrou o melhor ajuste foi o de WATSON (1989). Entretanto não foi adequado para determinações de propriedades de congelamento de polpas de fruta tais como: entalpia de fusão e fração de água não congelada. No DSC a quantidade de amostra utilizada é muito pequena (aproximadamente 14mg) e como o teor de sólidos insolúveis mostrou influenciar estas propriedades, o uso de pouca

amostra pode provocar erros consideráveis nas medidas.

O teor de água não congelada até a temperatura de fusão foi menor na amostra centrifugada, o que sugere ser um produto mais estável no armazenamento.

Os modelos utilizados para prever as propriedades termofísicas das polpas de manga, apresentaram resultados menos satisfatórios para altas concentrações de sólidos solúveis.

4.9. Sugestões

Para trabalhos futuros seria interessante que fossem feitas medidas de densidade com várias concentrações de sólidos solúveis, visto que o modelo que melhor conseguiu prever o comportamento da polpa de manga, o modelo de ALVARADO & ROMERO (1989) levava em consideração a concentração de sólidos solúveis além da temperatura.

Estudar os efeitos do pH, açúcares e outras variedades de manga na determinação das propriedades termofísicas, visto que a indústria trabalha com estas variações nos mesmos equipamentos durante a sua produção.

Determinar a condutividade térmica em polpas de fruta utilizando o Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC). Esta técnica permite que sejam obtidos resultados em um curto período de tempo e já vem sendo utilizada em alimentos sólidos (BUHRI & SINGH, 1993), sendo interessante portanto que estudos sejam feitos utilizando polpas de fruta.

5. Referências Bibliográficas

- A.O.A.C.- Association of Official Analytical Chemists, Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Washington, D.C., U.S.A, 13th ed., 1980.
- ALVARADO, J. d.; ROMERO, C. H.; Physical properties of fruits - I-II. Density and viscosity of juices as functions of soluble solids and content and temperature. Latin American Applied Research. v. 24, p. 41-47, 1989.
- ALVARADO, J. D. Propiedades físicas de frutas. IV- Difusividad y conductividad termica efectiva de pulpas. Latin American Applied Research. V. 24, p. 41-47, 1994.
- ASHRAE Fundamental handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, Cap. 31, 1985.
- BAGHE-KHANDAN, M. S.; CHOI, Y.; OKOS, R. M. Improved line heat source thermal conductivity probe. Journal of Food Science, v. 46, p. 1430-1432, 1981.
- BARONE, A.; Semi-desidratação congelamento e semi-desidratação secagem de cebola (*allium cepa* L.). Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP. (1997).
- BEZERRA, J. R. M. V.; Estudo reológico do suco de manga-efeito dos sólidos insolúveis. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP. (1997).
- BHOWMIK, S. R.; HAYAKAWA, K. I. A new method for determining the apparent thermal diffusivity of thermally conductive food. Journal of Food Science, v. 44, n. 2, 1979.

- BOTREL, N. Manga: variedades, qualidade e tecnologia pós-colheita. Informe Agropecuário. v.17, nº 179, p. 55-60, 1994.
- BUHRI, A. B.; SINGH, R. P. Measurement of food thermal conductivity using differential scanning calorimetry. Journal of food Science, v. 58, n. 5, 1993.
- CANEDO, E. L.; MARSON, J. S.; CALVELO. Método de la sonda para la determinacion de condutividad termica en carne. Universidad Nacional de La Plata. 1975. 23p. (Centro de Investigacion e Desarrollo en Csiotecnologia de Alimentos-CIDCA). n.8.
- CHARM, S. E. The fundamentals of food engineering. The fundamentals of food engineering. AVI Publishing Company Inc., Westport, 1971.
- CHITARRA, A. B.; CHITARRA, M. I. F. GT. Fisiologia pós colheita de frutos e hortaliças. XIV Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos-relatório de grupos de trabalho, 17-20 junho, São Paulo-SP, S.B.C.T.A, p.41-56, 1994.
- CHOI, Y.; OKOS, M. R. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. In: Lemauguer, M.; Jelen, M. Food Engineering and Process Applications. Elsevier Applied Science Publishers, 1986. p. 93-101.
- CHOI, Y.; OKOS, M. R. The thermal properties of tomato juice concentrates. Transactions of the ASAE. v. 26, p. 305-311, 1983.
- DALMO, L. S.; NEIDE, B.; VÂNIA, D. C.; VICTOR, H. V. R.; FLÁVIO, A. A. C. Características físicas e químicas de vinte cultivares de mangueira (*Mangifera indica* L.) em Uberaba-Mg. Revista Brasileira de Fruticultura. v. 10, nº 2, p. 49-54, 1988.
- DELGADO, A. E.; RUBIOLO, A. C.; GRIBAUDO, L. M. Effective heat capacity for strawberry freezing and thawing calculations. Journal of Food Engineering, v.

12. p. 165-175, 1990.

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

DICKERSON, R. W. Thermal Properties of Foods: The Freezing Preservation of Foods. 4. ed. The AVI Publishing Company, 1968. v. 2.

FRANCO, G. Tabela de Composição Química de Alimentos. 9 ed. SP. Atheneu, 1992, p. 177.

GAFFNEY, J. J.; BAIRD, C. D.; ESHLEMAN, W. D. Review and analysis of transient method for determining thermal diffusivity of fruits and vegetables. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, INC-Transactions. v. 86, p.261-280, 1980.

GUEGOV, Y. Phase transitions of water in some products of plant origin at low and superlow temperatures. Advances in Food Research, v. 27, p. 297-361, 1981.

HALLIDAY, P.J.; PARKER, R. SMITH, A.C. & STEER, D.C. The thermal conductivity of maize grits and potato granules. g. v. 26, p. 273-288, 1995.

HAYAKAWA, K.; SUCCAR, J. A method for determining the apparent thermal diffusivity of spherul foods. Lebensm. Wiss. u. Tech. v. 16, p. 373-375, 1983.

HAYES, C. Thermal diffusivity of papaya fruit. Journal of Food Science. v. 49, p. 1219-1221, 1984.

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

HENSE, H. Avaliação dos Parâmetros Termofísicos e a Cinética de Congelamento de Cação, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP,

166p., 1990.

HOOPER, F. C.; LEPPER, A.R. Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivity. Transactions of ASHVE, v. 56, p. 309, 1950.

HWANG, M. P.; HAYAKAWA, K. A specific heat calorimeter of foods. Journal of Food Science, v.44, p. 435-438, 1979.

INYANG, U. E.; AGBO, A. U. Effect of hot ash treatment of mango fruits on the physicochemical changer during ripening. Tropical Science, v. 35, p. 259-262, 1995.

I.B.G.E-FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-. Pesquisa de Orçamentos Familiares. Rio de Janeiro, 1992. v. 3, p. 43. (Série relatórios metodológicos, v. 10).

I.B.G.E- FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Anuário Estatístico do Brasil.. Rio de Janeiro, 1994. v. 54, p. 3.24.

ITAL-INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS. Manga: da cultura ao processamento e comercialização. Campinas, 399 p., 1981. (Revista de frutas tropicais nº 8).

INGERSOLL, L. R.; ZOBEL, O. J.; INGERSOLL, A. C.; Heat Conduction With Engineering, Geological and Other Applications. Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1954. p. 143-147.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz - Métodos Químicos e Físicos para Análise de Alimentos., São Paulo. v. 1, 2ª ed., 1976.

JHA, S. N.; PRASAD, S. Physical and thermal properties of gorgon nut. Journal of Food Process Engineering, v. 16, p. 237-245, 1993.

- KAZARIAN, E. A.; HALL, C. W. Thermal properties of grain. Transactions of the ASAE, v. 8, n. 1, 1965.
- LAMB, J. Influence of Water on the thermal properties of foods. Chemistry and Industry, v. 24, p. 1046-1048, 1976.
- LAU, K. A.; MARCH, K. V. L.; CUMMING, D. B. Physical properties of celery juice. Canadian Agricultural Engineering, v. 34, n. 1, 1992.
- LOMAURO, C. J.; BAKSHI, A. S.; LABUZA, T. P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: fruit, vegetable and meat products. Lebensm. Wiss. u. Technol., v. 18, p.111-117, 1985.
- LOVRIC, T.; PLIZOTA, V.; JANEKOVIC, A. DSC Study of the thermophysical properties of aqueous liquid and semi-liquid foodstuffs temperatures. Journal of Food Science, v. 52, n. 3, p. 772-776, 1987.
- MAGEE, T. R. A.; BRANSBURG, T. Measurement of thermal diffusivity of potato, malt bread and wheat flour. Journal of Food Engineering, v. 25, n. 2, p.223-232, 1995.
- MANNAPPERUMA, J. D.; SINGH, P. R. A Computer-Aided Method for the Prediction of Properties and Freezing/Thawing Times of Foods. Journal of Food Engineering, v. 9, n. 4,p. 273-304, 1989.
- MANOHAR, B.; RAMAKRISHNA, P.; UDAYASANKAR, K. Some physical properties of tamarind (*Tamarindus indica L.*) juice concentrates. Journal of Food Engineering, v. 13, p. 241-258, 1991.
- MOHSENIN, N. N. Thermal properties of food and agricultural materials. New York, Science Publishers, 1980.
- MURAKAMI, E. G.; SWEAT, V. E.; SASTRY, S. K.; KOLBE, E.; HAYAKAWA,

- K.; DATA, A. Recommended design parameters for thermal conductivity probes for nonfrozen food materials. Journal of Food Engineering. V. 27, p. 109-123, 1996.
- MURR, F. E. X. Estudo dos fenômenos de secagem da batata (*solanum tuberosum*, L. cultivar Bintje). Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia de Alimentos . UNICAMP, 1992.
- NATIVIDAD, F. R. E. Avaliação das características da polpa da manga (Mangífera indica L.) para elaboração e armazenamento de néctar. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, 1987.
- NEVES F^o, L. C. Armazenamento de gêneros alimentícios, 402 p., Governo do Estado de São Paulo, SP, 1983.
- NIX, G. H.; LOWERY, G. W.; VACHON, R. I.; TANGER, G. E. Direct determination of thermal diffusivity and conductivity with a refined line-source technique. In: Heller, G. G. (Ed.), Progress in Astronautics and Aeronautics. New York: Academic Press, pp. 865-877, 1967.
- O'NEILL, M. J. Measurement of Specific Heat Functions by Differential Scanning Calorimetry. Analytical Chemistry, v.38, n.10,1966.
- PARK, K. J.; MURR, F. E. X. ; SALVADEGO, M. Construção de um sistema de medição da condutividade térmica pelo método da sonda, Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 17, n. 1, p. 7-10, 1997.
- PASQUALONE, S.; MASTANDREA, N. Le proprietà termiche degli alimenti congelati. Industrie Alimentari. V. 34, n. 3, p. 261-267, 1995.
- PEACOCK, S. Predicting physical properties of factory juices and syrups. International Sugar Journal. v. 97, no. 1162. 1995.

- PEARSON, D. Laboratory Techniques in Food Analysis. London Butterworths, London, 1973.
- PHAM, Q. T. Prediction of calorimetric properties and freezing time of foods from composition data. Journal of Food Engineering, v. 30, 1996.
- POLLEY, S. I.; SNYDER, O. P.; KTNOUR, P. A compilation of thermal properties of foods. Food Technology. p. 76-94, 1980.
- PONGSAWATMANIT, R.; MIYAWAKI, O. Measurement of temperature-dependent ice fraction in frozen foods. Biosc. Biotech. and Biochemistry, v.57, n.10 1993.
- QASHOU, M.; VACHON, R.I.; TOULOUKIAN, Y. W. Thermal conductivity of foods. ASHRAE: Semi-Annual Meeting New Orleans, 1972.
- RAMASWAMY, H. S.; TUNG, M. A. Thermophysical properties of apples in relation to freezing. Journal of Food Science, v. 46, p. 724-728, 1981.
- RANGANNA, S. Manual of Analysis of Fruit and Vegetable Products. Tata Mc Graw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1978.
- RAO, M. A. ; BARNARD, J. ; KENNY, J. F. Thermal Conductivity and thermal diffusivity of process variety squash and white potatoes. Transactions of the ASAE, v.18, p. 1188-1192, 1975.
- REIDY, G.A. ; RIPPEN, A.L. Methods or determining thermal conductivity in foods. Transaction of the ASAE, v.14, n. 2, p. 248-254, 1971.
- RENAUD.; T. BRIERY.; P. ANDRIEU.; J. LAURENT, M. Thermal properties of model foods in the frozen state, Journal of Food Engineering, v. 15, p. 83-97, 1992.
- RIZVI, S. S. H.; BLAISDELL.; HARPER, W. J. Thermal diffusivity of model meat

- analog systems. Journal of Food Science, v. 45, 1980.
- RODRIGUES, J. A. S.; PINHEIRO, R. V. R.; MANICA, I.; CASALI, V. W.D. ; CONDÊ, A. R. Comportamento de de dez variedades de manga (*Mangifera indica* L.) em Viçosa e Visconde do Rio Branco. Ceres, v. 24, n. 136, p. 580-595, 1977. Nov/Dez.
- ROE, B.; BRUEMMER, J. H. Changes in pectic substances and enzymes during ripening and storage of "Keitt" mangos. Journal of Food Science, v. 16, p. 187-189, 1981.
- ROEHRIG, G. K. L.; The physiological effects of dietary fiber a review. Food Hydrocolloids. Oxford, v. 2, n. 1, p. 1-18, 1988.
- SERENO, A. M.; SÁ, M. M.; FIGUEIREDO, A. M.; CORREA, A. Apparent Heat Capacities, Initial Melting Points and Heats of Meeting Frozen Fruits Measurement by Differential Scanning Calorimetry. Revista Española de Ciencia e Tecnologia de Alimentos. v. 34, n. 2, p. 202-209, 1994.
- SHARMA, D. K.; THOMPSON, Y. L. Specific heat and thermal conductivity of sorghum. Transaction of the ASAE, v. 18, p. 1188-1192, 1973.
- SINGH, P. Thermal diffusivity in food processing. Food Technology, v. 36, p.87-91, 1982.
- SOUTHGATE, D. A. T. What is "dietary fibre"? Food Technology in Austrália, North Sydney, v. 33, n. 1, p. 24-25, jan. 1981.
- SPELLS, K. E. Thermal conductivity of some biological fluids. Phys. in Medic. and Biol. v. 5, n. 7, p. 139-153, 1960.
- SREENARAYANAN, V. V.; CHATTOPADHYAY, P. K. Thermal conductivity and diffusivity of rice bran. Journal Agricultural Engineering Research, v. 34, p. 115-

121, 1986.

SILVA, S. B. Propriedades termofísicas da polpa de abacaxi. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, 1997.

SINGH, P. C.; SINGH, S. B.; SINGH, S. N.; BARONE, P. thermophysical properties of roasted coffee powders. Journal of Food Process Engineering, v. 20, p. 31-50, 1997.

SUTER, D. A.; AGRAVAL, K. K.; CLARY, B. L. Thermal properties of peanut pods, hulls and kernels. Transaction of the ASAE, v. 18, n. 2, p. 370-375, 1972.

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

SWEAT, V. E. Thermal Properties of Foods. In: Engineering Properties of Foods. Rao, M. A.; RIZVI, S. S. H. New York, Marcel Dekker Inc., 397 p., 1986.

TERESA, M. V. R. B.; SANTOS, R. C.; FERNANDES, A. C.; PIEDADE, M. E. M. Thermochimica Acta. V. 269/270, p. 51-60, 1995.

TOULOUKIAN, Y. S. & BUYCO, E. Y. thermophysical properties of master-The TPRC data series, New York: IFI/Plenum Press, v. 5, pp. 24-29, 1979.

VAN DER HELD, E.F.M. ; VAN DRUNEN, F.G. A method of measuring the thermal conductivity of liquids. Physica, v. 15, p. 865-881, 1949.

VASQUES-SALINAS, C.; LAKSHMINAROYA, S. Journal of Food Science, Chicago, v. 50, p. 1646-1648, 1985.

VIEIRA, J.A.G. Propriedades termofísicas e convecção no escoamento laminar de suco de laranja em tubos. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, 1996.

- VOUDOURIS, N.; HAYAKAWA, K. Simultaneous determination of thermal and diffusivity of foods using a point heat source probe: A theoretical analysis. Lebensmittel -Wissenschaft und - Technologie. v. 27, p. 522-532, 1994.
- ZIEGLER, G. R.; RIZVI, J.S.S.H. Thermal conductivity of liquids foods by the thermal comparator method; Journal of Food Science, v. 50, p. 1458, 1985.
- WANG, N.; BRENNAN, J. G. The influence of moisture content temperature on the specific heat of potato measured by differential scanning calorimetry. Journal of Food Engineering. v. 20, n. 3, p. 303-310, 1993.
- WANG, Q.; KOLBE, E. Thermal properties of surimi analyzed using DSC. Journal of Food Science, v. 56, n. 2, 1991.
- WRIGHT, M. E.; PORTERFIELD, J.G. Specific heat of Spanish peanut. Transactions of the ASAE. v.13, .n.14, p. 508-510, 1970.