



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
COPEAG - CGORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Dissertação de Mestrado

COMPORTAMENTO REOLÓGICO E PROPRIEDADES
TERMOFÍSICAS DA POLPA DO FRUTO
DO MANDACARU

AVARES NUNES

Biblioteca UFCEG
SMBC_CDSA
CAMPUS DE SUMÉ
Reg. 10529/12

Campina Grande
Paraíba



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS
NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA
AGRÍCOLA



DISSERTAÇÃO

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM PROCESSAMENTO E
ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS

Dis
631(043.3)
N 972C
vx. 0L

COMPORTAMENTO REOLÓGICO E PROPRIEDADES
TERMOFÍSICAS DA POLPA DO FRUTO DO MANDACARU



JOÃO TAVARES NUNES

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA
SETEMBRO, 2011

**COMPORTAMENTO REOLÓGICO E PROPRIEDADES
TERMOFÍSICAS DA POLPA DO MANDACARU**

JOÃO TAVARES NUNES

**Dissertação apresentada ao
Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola da
Universidade Federal de Campina
Grande, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Agrícola.**

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

**ORIENTADORES: Prof. Dr. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo
Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz**

**Campina Grande - Paraíba
Setemhro - 2011**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

N972c Nunes, João Tavares.
Comportamento reológico e propriedades termofísicas da polpa do fruto do mandacaru / João Tavares Nunes. — Campina Grande, 2011.
95 f.: il. col.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
Orientadores: Prof. Dr.ª. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo e Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz.
Referências.

1. *Cereus jamaracu*. 2. Massa específica. 3. Calor Específico.
4. Condutividade Térmica. I. Título.

CDU 634.775(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JOÃO TAVARES NUNES

**COMPORTAMENTO REOLÓGICO E PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA
POLPA DO MANDACARU**

BANCA EXAMINADORA

PARECER

Rossana M^a F. de Figueirêdo
Dra. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo – Orientadora

Aprovado

Alexandre J. M. Queiroz
Dr. Alexandre José de Melo Queiroz – Orientador

APROVADO

Flávio Luiz Honorato da Silva
Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva – Orientador

Aprovado

Vimário S. S. Silva
Dr. Vimário Simões Silva – Examinador

Aprovado



SETEMBRO - 2011

“O que conta não é o sucesso que se vê; é dar-sem reservas: é crescer nesse dom generoso e sobretudo fazer os outros crescerem.”

L. J. Lebrei

AGRADECIMENTOS

A **DEUS** pela presença constante em minha vida sempre me protegendo e me ensinando a nunca desanimar diante das dificuldades.

A meus pais, Francisco e Jacinta, por terem me deixado a maior herança o subjuço a **DEUS** e o meu caráter.

A minha querida esposa Selda, por ter me proporcionado a oportunidade de construir minha família.

Às minhas filhas Paula, Roberta e Carolina, por me amarem tal qual sou e por me permitirem que as ame.

À Prof.^a Dr.^a Rossana Maria Feitosa Figueirêdo pelas orientações, paciência e atenção.

Ao Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz, pelas orientações e ensinamentos, úteis para o meu crescimento intelectual.

À Prof.^a Dr.^a Josivanda Palmeira Gomes, por todo trabalho de coordenação para que este momento viesse à se concretizar.

À Universidade Federal de Campina Grande pela organização, empenho e acolhimento.

À FACEPE, pelo apoio financeiro necessário ao desenvolvimento deste projeto.

Ao IFPE, pela luta incansável, a prol deste MINTER.

Ao Prof.^o Dr. Pires Galvão, por viabilizar a coleta dos frutos indispensáveis a esta pesquisa.

Aos demais professores que contribuíram, através de seus ensinamentos, para a obtenção deste título.

Ao coordenador do projeto, Prof. Dr. Francisco Braga, pelo empenho e condução do Minter.

Aos doutorandos Edmilson, Vanessa, Leila, Karla e Tâmila, pela atenção e orientações no decorrer do experimento.

Aos nossos colegas de turma, em especial Vansostenes e Nélio, pela troca de conhecimentos, irmandade e parcerias incansáveis.

A todos que, de alguma forma, participaram deste trabalho, muito obrigado!



SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
I – INTRODUÇÃO	I
1.1– Objetivo Geral	3
1.1.1 – Objetivos específicos	3
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 – Mandacaru	4
2.2 - Caracterização química, física e fisico – química.....	5
2.2.1 – pH	5
2.2.2 - Sólidos solúveis totais (°Brix)	6
2.2.3 – Atividade de água (a_w)	7
2.2.4 – Umidade	7
2.2.5 - Sólidos totais	8
2.2.6 – Cinzas	8
2.2.7 - Análise de cor	9
2.3 - Reologia	9
2.3.1 - Fluidos newtonianos	10
2.3.2 - Fluidos não newtonianos	10
2.3.2.1 - Fluidos independentes do tempo	11
2.3.2.1.1 - Fluidos pseudoplásticos	11
2.3.2.1.2 – Fluidos dilatantes	12
2.3.2.2 – Fluidos dependentes do tempo	12
2.3.2.2.1 - Fluidos tixotrópicos	12
2.3.2.2.2 - Fluidos reopéticos	13
2.3.2.3- Fluidos viscoelásticos	13
2.4- Reometria	13
2.4.1- Modelos reológicos	14
2.4.1.1- Modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potencia)	14
2.4.1.2- Modelo de Casson	15

2.4.1.3 - Modelode Herschel Bulkley	15
2.5 – Propriedades termofísicas	16
2.5.1 – Massa específica.....	16
2.5.2 – Calor específico	18
2.5.3 – Condutividade térmica	21
2.5.4 – Difusividade térmica	22
3 - MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1 - Matéria-prima	26
3.2 - Processamento dos frutos do mandacaru	26
3.2.1 - Recepção e seleção	27
3.2.2 – Lavagem	27
3.2.3 – Despulpamento	27
3.2.4 – Embalagem	27
3.2.5 – Congelamento	27
3.2.6 – Armazenamento	28
3.3 – Preparo das amostras	28
3.4- Caracterização química, física e físico-química.....	28
3.4.1 - Sólidos solúveis totais	28
3.4.2- Sólidos totais e umidade	28
3.4.3- Atividade de água	28
3.4.4- Cinzas	28
3.4.5 -Análise de cor	29
3.5 – Propriedades reológicas	29
3.5.1 - Influência da temperatura	29
3.6 - Propriedades termofísicas	30
3.6.1 - Massa específica	30
3.6.2 - Calor específico	31
3.6.3 - Difusividade térmica	33
3.6.4 - Condutividade térmica	35
3.7 - Análises estatísticas	36
3.8 - Erro percentual	36
4- RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1- Caracterizações química, física e físico-química.....	37



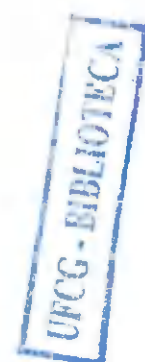
4.2 - Comportamento reológico	39
4.2.1 – Modelos reológicos	39
4.2.2 – Viscosidades aparentes	49
4.2.2.1 – Efeito da temperatura	55
4.3 – Propriedades termofísicas	62
4.3.1 – Massa específica	62
4.3.2 – Calor específico	64
4.3.3 – Difusividade térmica	65
4.3.4 – Condutividade térmica	66
5 – CONCLUSÕES	68
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
APENDICE A	86
APENDICE B	91



LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Equações para estimar a massa específica teórica de sucos e polpa de frutas	18
Tabela 3.1 -	Equações utilizadas no cálculo teórico da massa específica das polpas do mandacaru	31
Tabela 3.2 -	Equações utilizadas para o cálculo teórico do calor específico das polpas	33
Tabela 3.3 -	Equações utilizadas no cálculo teórico da difusividade térmica das polpas de mandacaru	35
Tabela 3.4 -	Equações utilizadas no cálculo teórico da condutividade térmica das polpas de mandacaru	36
Tabela 4.1 -	Valores médios dos parâmetros químicos, físicos, físico-químicos da polpa de mandacaru integral e concentradas	37
Tabela 4.2 -	Parâmetros, coeficientes de determinação (R^2) e desvios percentuais médios (P) dos modelos reológicos para a polpa do fruto do mandacaru integral (12 °Brix)	40
Tabela 4.3 -	Parâmetros, coeficientes de determinação (R^2) e desvios percentuais médios (P) dos modelos reológicos para a polpa do fruto do mandacaru com 35 °Brix	43
Tabela 4.4 -	Parâmetros, coeficientes de determinação (R^2) e desvios percentuais médios (P) dos modelos reológicos para a polpa do fruto do mandacaru com 56 °Brix	46
Tabela 4.5 -	Viscosidade aparente (Pa s) da polpa de mandacaru integral (12 °Brix) em função da velocidade de rotação e temperatura	50
Tabela 4.6 -	Viscosidade aparente (Pa s) da polpa de mandacaru 35 °Brix em função da velocidade de rotação e temperatura	52
Tabela 4.7 -	Viscosidade aparente (Pa s) da polpa de mandacaru 56 °Brix em função da velocidade de rotação e temperatura	53
Tabela 4.8 -	Viscosidades aparentes iniciais teóricas (η_0) e energias de ativação (E_a) da polpa do mandacaru integral (12 °Brix) calculadas a partir da equação de Arrhenius	56
Tabela 4.9 -	Valores de viscosidades iniciais teóricas (η_0) e de energia de	

	ativação (E_a) da polpa do mandacaru com 35°Brix calculadas a partir da equação de Arrhenius.....	58
Tabela 4.10	- Comparação entre as energias de ativação (E_a) das polpas do mandacaru com 12 e 35 °Brix a partir da equação de Arrhenius ...	59
Tabela 4.11	- Viscosidades aparentes iniciais teóricas (η_0) e energias de ativação (E_a) da polpa do mandacaru com 56 °Brix calculadas a partir da equação de Arrhenius	61
Tabela 4.12	- Comparação entre as energias de ativação (E_a) das polpas do mandacaru com 35 e 56 °Brix calculadas a partir da equação de Arrhenius	61
Tabela 4.13	- Massa específica (g/cm^3) da polpa de mandacaru em função da temperatura e da concentração	62
Tabela 4.14	- Valores teóricos da massa específica para a polpa de mandacaru e os erros percentuais	63
Tabela 4.15	- Valores médios do calor específico da polpa do mandacaru nas diferentes concentrações.....	64
Tabela 4.16	- Valores teóricos do calor específico para a polpa de mandacaru e os erros percentuais	65
Tabela 4.17	- Média da difusividade térmica (m^2/s) da polpa do mandacaru com diferentes concentrações	65
Tabela 4.18	- Valores teóricos da difusividade térmica (m^2/s) para a polpa do fruto do mandacaru e os erros percentuais	66
Tabela 4.19	- Condutividade térmica da polpa do mandacaru com diferentes concentrações	67
Tabela 4.20	- Valores teóricos da condutividade térmica (W/mK) da polpa do fruto do mandacaru	67
Tabela A.1	- Análise da variância do pH da polpa do fruto do mandacaru nas concentrações de 12; 35 e 56 °Brix	87
Tabela A.2	- Análise de variância da viscosidade aparente da polpa do fruto do mandacaru integral (12 °Brix), em função da velocidade de rotação e temperatura	87
Tabela A.3	- Análise de variância da viscosidade aparente da polpa do fruto do	



	mandacaru com 35 °Brix, em função da velocidade de rotação e temperatura	87
Tabela A.4 -	Análise de variância da viscosidade aparente da polpa do fruto do mandacaru com 56 °Brix, em função da velocidade de rotação e temperatura	88
Tabela A.5 -	Análise da variância da massa específica da polpa do fruto do mandacaru com as concentrações de 12; 35 e 56 °Brix, respectivamente nas temperaturas de 5;10 ; 20; 25; 30; 40 e 50 °C	88
Tabela A.6 -	Análise da variância da difusividade da polpa do fruto do mandacaru nas concentrações de 12; 35 e 56 °Brix	88
Tabela A.7 -	Análise da variância do calor específico da polpa do fruto do mandacaru nas concentrações de 12; 35 e 56 °Brix	89
Tabela A.8 -	Análise da variância da condutividade térmica da polpa do fruto do mandacaru nas concentrações de 12; 35 e 56 °Brix	89
Tabela A.9 -	Análise da variância da atividade de água da polpa do fruto do mandacaru nas concentrações de 12; 35 e 56 °Brix na temperatura de 20°C	89
Tabela A.10 -	Análise da variância da umidade da polpa do fruto do mandacaru nas concentrações de 12; 35 e 56 °Brix na temperatura de 20°C ...	89
Tabela A.11 -	Análise da variância dos sólidos totais da polpa do fruto do mandacaru nas concentrações de 12; 35 e 56 °Brix a 20°C	90
Tabela A.12 -	Análise da variância da luminosidade da polpa do fruto do mandacaru nas concentrações de 12; 35 e 56 °Brix	90
Tabela A.13 -	Análise da variância da intensidade de amarelo da polpa do fruto do mandacaru nas concentrações de 12; 35 e 56 °Brix	90
Tabela A.14 -	Análise da variância da intensidade de vermelho da polpa do fruto do mandacaru nas concentrações de 12; 35 e 56 °Brix	90



LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Vista do mandacaru (<i>cereus jamacaru</i>) em frutificação.....	5
Figura 3.1 - Fluxograma do processamento do fruto do mandacaru	26
Figura 3.2 - Calorímetro de mistura e medidor de temperatura	31
Figura 3.3 - Aparato para determinação da difusividade térmica	33
Figura 3.4 - Diagrama da temperatura-tempo para determinação de difusividade térmica	34
Figura 4.1 - Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do mandacaru na concentração de 12 °Brix, com ajuste pelo modelo Herschel Bulkey.....	42
Figura 4.2 - Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do mandacaru na concentração de 35 °Brix, com ajuste pelo modelo Herschel Bulkey.....	45
Figura 4.3 - Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do mandacaru na concentração de 56 °Brix, com ajuste pelo modelo Herschel Bulkey.....	49
Figura 4.4 - Viscosidade aparente da polpa de mandacaru integral (12 °Brix) em função da velocidade de rotação nas diferentes temperaturas	51
Figura 4.5 - Viscosidade aparente da polpa de mandacaru com 35 °Brix em função da velocidade de rotação nas diferentes temperaturas	53
Figura 4.6 - Viscosidade aparente da polpa de mandacaru com 56 °Brix em função da velocidade de rotação nas diferentes temperaturas	54
Figura 4.7 - Viscosidade aparente da polpa de mandacaru com 12 °Brix em função do inverso da temperatura nas diferentes velocidades de rotação	55
Figura 4.8 - Viscosidade aparente da polpa de mandacaru com 35 °Brix em função do inverso da temperatura nas diferentes velocidades de rotação	57
Figura 4.9 - Viscosidade aparente da polpa de mandacaru com 56 °Brix em função do inverso da temperatura nas diferentes velocidades de rotação	60

Figura B.1 -	Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do fruto do mandacaru na concentração de 12 °Brix com ajustes pelo modelo de Ostwald-de-Waelle.....	92
FiguraB.2-	Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do fruto do mandacaru na concentração de 35 °Brix com ajustes pelo modelo de Ostwald-de-Waelle.....	92
FiguraB.3-	Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do fruto do mandacaru na concentração de 56 °Brix com ajustes pelo modelo de Ostwald-de-Waelle.....	93
FiguraB.4-	Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do fruto do mandacaru na concentração de 12 °Brix com ajustes pelo Modelo Casson.....	93
FiguraB.5-	Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do fruto do mandacaru na concentração de 35 °Brix com ajustes pelo modelo de Casson	94
FiguraB.6-	Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do fruto do mandacaru na concentração de 56 °Brix com ajustes pelo Modelo Casson.....	94
FiguraB.7-	Temperatura no centro da polpa do mandacaru com 12 °Brix e na superfície do cilindro de Dickerson em função do tempo.....	95
FiguraB.8-	Temperatura no centro da polpa do mandacaru com 35 °Brix e na superfície do cilindro de Dickerson em função do tempo.....	95
FiguraB.9-	Temperatura no centro da polpa do mandacaru com 56 °Brix e na superfície do cilindro de Dickerson em função do tempo.....	96

Dissertação de Mestrado: **Comportamento reológico e propriedades termofísicas da polpa do mandacaru**

Autor: João Tavares Nunes

Orientadores: Prof. Dr. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo

Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz

RESUMO

Com o intuito de aproveitar o fruto do mandacaru produzido na região semiárida do Nordeste visando à produção de polpas e sucos, o presente trabalho teve como objetivo determinar as principais propriedades termofísicas, massa específica, condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico, além do comportamento reológico das polpas integral e concentradas do fruto do mandacaru até os teores de 35 e 56 °Brix. A massa específica foi determinada pelo método picnométrico; para a difusividade térmica utilizou-se o método do cilindro infinito de Dickerson; o valor do calor específico foi obtido usando através do método das misturas e a condutividade térmica foi calculada por método indireto. Equações propostas em literatura também foram utilizadas para estimar as propriedades termofísicas. Os dados reológicos foram determinados utilizando-se um viscosímetro Brookfield e os modelos de Casson, Ostwald-de-Waele e Herschel-Bulkley, ajustados aos dados experimentais, ressaltando-se que o último modelo foi o que proporcionou os melhores ajustes. As polpas com a concentração de 12 °Brix apresentaram comportamento não-newtoniano do tipo dilatante; no entanto, as polpas com concentrações de 35 e 56 °Brix apresentaram comportamento não newtoniano do tipo pseudoplástico. A viscosidade foi influenciada pela concentração e temperatura. A polpa integral do fruto do mandacaru foi considerada um alimento ácido, com baixo conteúdo mineral, alto teor de umidade e de atividade de água, com predominância da intensidade de amarelo. As propriedades termofísicas se mantiveram em faixa esperada para polpas de frutas. A massa específica aumentou com o aumento do teor de sólidos solúveis totais e o calor específico e a difusividade térmica diminuíram com o aumento da concentração. Das equações utilizadas para estimar a massa específica, calor específico, difusividade térmica e condutividade térmica, apenas as referentes a massa específica podem ser consideradas razoáveis para todas as amostras, com erros abaixo de 20%.

Palavras-chave: *Cereus jamacaru*, massa específica, calor específico, condutividade térmica, difusividade térmica, viscosidade

Master's Dissertation: **Rheological behavior and thermophysical properties of *mandacara* fruit pulp**

Author: **João Tavares Nunes**

Advisors: **Prof. Dr. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo**

Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz

ABSTRACT

In order to make better use of *mandacaru* fruit grown in the semiarid Northeast of Brazil for pulp and fruit production, this study sought to determine the main thermophysical properties, density, thermal conductivity and specific heat capacity, in addition to rheological behavior of whole and concentrated *mandacaru* fruit pulp up to a content of 35 and 56 °Brix. Density was determined by the pycnometric method; the Dickerson infinite cylinder method was used for thermal diffusivity; the heat capacity value was obtained by the method of mixtures and thermal conductivity by the indirect method. Equations proposed in the literature were also applied to estimate thermophysical properties. Rheological data were determined using a Brookfield viscometer and Casson, Ostwald-de-Waele and Herschel-Bulkley models. fit to experimental data, with the last model exhibiting best fit. Pulp with a concentration of 12 °Brix showed dilatant non-Newtonian behavior; however, those with concentrations of 35 and 56 °Brix displayed pseudoplastic non-Newtonian behavior. Viscosity was influenced by concentration and temperature. *Mandacaru* whole fruit pulp, predominantly yellow, was considered acidic, with low mineral content, high moisture content and water activity. Thermophysical properties were in the expected range for fruit pulp. Density increased with a rise in soluble solid content, while heat capacity and thermal diffusivity decreased with increased concentrations. Of the equations used to estimate density, heat capacity, thermal diffusivity and thermal conductivity, only those related to density are adequate for all samples, with an error of less than 20%.

Keywords: *Cereus jamacaru*, density, heat capacity, thermal conductivity, thermal diffusivity, viscosity

1 – INTRODUÇÃO

Para o dimensionamento de equipamentos destinados a manipulação, transporte e embalagem de sucos e polpas de frutas, necessário se faz conhecer as propriedades termofísicas e o comportamento reológico desses materiais. Na industrialização destas matérias-primas, pasteurização e concentração, entre outros, são processos com aquecimento largamente usados, tal como o emprego de baixas temperaturas para a preservação da qualidade. Referidos processos envolvem gastos expressivos com energia, instalações e equipamentos, necessários para manuseio, condução e armazenamento de sucos e polpas de frutas e no retardamento dos processos metabólicos e microbiológicos (SARRIA & HONÓRIO, 2004). As cargas energéticas requeridas por determinado material dependem da sua natureza termofísica, expressa por propriedades como massa específica, calor específico, difusividade térmica, condutividade térmica e comportamento reológico. O conhecimento dessas propriedades torna possível o projeto de equipamentos e de operações que envolvam transferência de calor.

Segundo MOHSENIN (1980) em cálculos de transferência de calor é comumente utilizado o conceito de massa específica que expressa a quantidade de matéria contida em uma unidade de volume. A massa específica tem importância na caracterização, identificação e utilização de substâncias ou de materiais e muitos processos químicos são medidos através do seu controle (SILVA et al., 1990). De acordo com RAMOS & IBARZ (1998), dados de massa específica e sua variação com a concentração e a temperatura são muito importantes para a indústria de alimentos em geral e, em particular, para derivados de frutas, visto que são necessários para projetos e otimização de várias operações de processos (bombeamento, evaporação, transferência de calor, etc).

O calor específico é uma propriedade termofísica definida como a quantidade de calor necessária para mudar a temperatura de uma unidade de massa de uma substância em um grau, sendo significativamente afetado pela quantidade de água presente no alimento e pelo estado físico desta água (LEWIS, 1993). De acordo com PEDROZA (1991), o calor específico de uma substância denota a variação de temperatura com a quantidade de calor armazenada dentro da substância. O calor específico depende da natureza do processo de adição de calor, isto é, se o processo ocorre a pressão constante ou a volume constante. Nos processos de transferência de calor a que são submetidos os materiais biológicos, a variação de pressão é muito pequena, utilizando-se o conceito de calor específico a pressão constante (MOHSENIN, 1980).

Uma das propriedades térmicas utilizadas nos cálculos de transferência de calor por condução é a difusividade térmica, que estabelece a velocidade com que o calor se difunde no alimento e a relação entre o tempo e a temperatura. A difusividade térmica dá uma medida de como a temperatura pode variar quando um material é submetido a uma situação de aquecimento ou resfriamento (LEWIS, 1993).

Para RAO & RIZVI (1994) a condutividade térmica de um material é a medida da sua capacidade para conduzir calor. Nos alimentos, a condutividade térmica está à mercê principalmente da sua composição mas também da presença de espaços vazios e de sua homogeneidade. De acordo com PIETROBON et al. (1987), a condutividade térmica é um parâmetro fundamental em qualquer processo térmico, tanto no que diz respeito ao dimensionamento de equipamentos quanto a sua otimização e conservação de energia, e também, na caracterização de substâncias.

O comportamento reológico dos fluidos alimentícios, como polpas e sucos de frutas, também é fator de grande importância no dimensionamento dos equipamentos da indústria processadora, além de se constituir em um dos fatores de avaliação da qualidade do produto. O comportamento reológico desses materiais, cuja composição é constituída basicamente de água, além da presença de variados sólidos solúveis e insolúveis, resulta da interação entre esses elementos que contribuem, de forma isolada ou potencializada, quando combinados (QUEIROZ, 1998). Os sólidos insolúveis, por sua vez, têm influência importante sobre as propriedades reológicas de sucos e polpas (AMSTALDEN, 1996; BEZERRA, 1997; QUEIROZ, 1998) e sua eliminação, total ou parcial, tem lugar na elaboração de processados com diferentes graus de turbidez.

De acordo com DRUMOND (2000) o Nordeste do Brasil tem a maior parte de seu território ocupada por uma vegetação xerófila, denominada caatinga, a qual ocupa cerca de 11% do território nacional, abrangendo os estados da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí e Minas Gerais. Na cobertura vegetal das áreas da região Nordeste a caatinga representa cerca de 800.000 km², o que corresponde a 70% da região; no entanto, poucos são os estudos encontrados na literatura sobre os frutos desta vegetação que, apesar de serem encontrados em grandes quantidades nos períodos da primavera, não são explorados comercialmente.

O mandacaru é uma cactácea que vegeta nas caatingas nordestinas, de grande importância para a sustentabilidade e conservação da biodiversidade do bioma da caatinga; seus frutos constituem alimentos para pássaros e animais silvestres e, mesmo em período de grandes estiagens, esta cactácea é largamente utilizada pelos agricultores, na

alimentação dos animais e pessoas. Segundo ROCHA & AGRA (2000), o fruto do mandacaru é uma baga elipsoidal, com aproximadamente 12 cm de comprimento, vermelho, carnoso, de polpa branca, com inúmeras sementes pretas e bem pequenas; entretanto não existem na literatura, trabalhos relacionados as propriedades termofísicas e reológicas da polpa do fruto do mandacaru.

1.1 – Objetivo geral

Estudar o comportamento reológico e as propriedades termofísicas da polpa do fruto do mandacaru integral, e concentrada.

1.1.1 - Objetivos específicos

Caracterizar a polpa integral do fruto do mandacaru e as polpas concentradas quanto ao teor de sólidos solúveis totais, umidade, sólidos totais, cinzas, atividade de água, cor e pH;

Avaliar o comportamento reológico da polpa integral e das polpas concentradas (35 e 56 °Brix) nas temperaturas de 5 a 60 °C e ajustar os modelos reológicos Lei da Potência, Casson e Herschel-Bulkley aos reogramas dessas polpas;

Analisar o comportamento da viscosidade aparente da polpa integral e das polpas concentradas em função da temperatura e da velocidade de rotação;

Quantificar a massa específica das polpas integral e concentradas do fruto do mandacaru nas temperaturas de 5 a 60 °C;

Determinar o calor específico, a difusividade térmica e a condutividade térmica das polpas integral e concentradas.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Mandacaru

O mandacaru (*Cereus Jamacaru*) é uma planta da família das cactáceas. É comum no nordeste brasileiro, atingir até mais de 5 metros de altura. Existe uma variedade sem espinhos, usada na alimentação de animais. A variedade comum é altamente espinhenta e também usada na alimentação de animais, quando seus espinhos são queimados ou cortados. O mandacaru resiste a secas, mesmo das mais fortes. As flores desta espécie de cactos são brancas e medem aproximadamente 30 cm de comprimento. Seu fruto tem cor violeta forte. A polpa é branca, com sementes pretas minúsculas, muito saborosa, servindo de alimento para diversas aves típicas da caatinga. Segundo RIZZINI & MORS (1995), a polpa se desprende inteira da casca após o corte, tem aroma e sabor delicados e peculiares e, embora se constitua em uma riqueza potencial para regiões secas não tem exploração comercial sendo, quando muito, utilizada para elaboração de doces e geléias.

Conforme DAVET et al. (2009), o mandacaru, é um cacto característico da região semi-árida do Brasil. Para o gado, o uso justifica-se pela capacidade de armazenar grande quantidade de água (cerca de 15%). A quantidade de proteína bruta chega a mais de 10% e o resíduo mineral, a 10,66%, dos quais 0,22% são em P_2O_5 e 5,61% em CaO. O uso medicinal popular é pouco difundido; diz-se que as raízes e o caule são diuréticos e melhoram males do coração.

SILVA & ALVES (2009), estudaram as características físico-químicas da polpa e da casca do fruto do mandacaru tendo as mesmas apresentadas as seguintes composições: a casca do fruto apresentou valor de pH de 4,42 e a da polpa de 4,40, e os teores de ácido ascórbico para a polpa foram de 100 mg/100 g de polpa e casca de 80 mg/100 g de polpa.

Alguns estudos sobre a composição *in vitro* do mandacaru (fonte forrageira) foram realizados por ARAÚJO (2001); no entanto, poucos são os estudos encontrados na literatura sobre os frutos dessa planta, embora sejam encontrados no semiárido não são comercializados e pouco industrializados.





Figura 2.1 - Vista do mandacaru (*Cereus jamacaru*) em frutificação

2.2 - Caracterização química, física e físico - química

Ao se realizar uma análise de alimentos, as informações obtidas podem ter o caráter distinto, ou seja, pode-se obter dados de composição centesimal, dados de componentes de interesse, de componentes "traços" (aromatizantes, conservantes, antioxidantes, corantes etc.) e dados da presença de contaminantes (MADRUGA & ALDRIGUE, 2002).

A espécie humana se alimenta de produtos de origem vegetal e animal que contém as bases nutritivas necessárias à vida. Cada uma dessas bases exerce função definida e pode ser requerida em maior ou menor proporção; todas, porém, igualmente significativas; as frutas são importantes por fornecerem vitaminas e sais minerais podendo, eventualmente, fornecer carboidratos, porém com muitas mudanças na composição.

2.2.1- pH

Por definição o pH é igual ao inverso do logaritmo da concentração hidrogeniônica (Equação 2.1).

$$\text{pH} = \log \frac{1}{\text{H}} \quad (2.1)$$

A concentração de íons hidrogênio (pH) de um alimento é evidenciada pela influência que exerce sobre os tipos de micro-organismos aptos à sua multiplicação e, portanto, sobre as alterações que, logicamente, deveriam produzir (GAVA, 1979).

O pH mede a acidez das frutas e alimentos. De maneira geral, os alimentos apresentam pH inferior a 7,0; é o pH que indica o tipo de tratamento necessário para conservar os alimentos. Alimentos com pH acima de 4,5 exigem altas temperaturas, por terem maior facilidade para o desenvolvimento de micro-organismos, as frutas e seus derivados apresentam, em geral, valores de pH abaixo de 4,5 (LEITÃO, 1980). Certas frutas com pH > 4,5 precisam ser acidificadas para serem processadas a pressão atmosférica; geralmente esse tratamento é feito com ácido cítrico (TORREZAN, 1997).

Pesquisas têm evidenciado que o valor de 4,5 do pH é o limite para o crescimento do *Clostridium botulinum*, a mais termorresistente bactéria patogênica encontrada em alimentos. Este aspecto é de influência decisiva na natureza e intensidade do processo térmico de alimentos; produtos com pH superior a 4,5 são, geralmente, esterilizados sob pressão, o que não ocorre com aqueles de pH inferior a 4,5 que, usualmente, são preservados por tratamentos térmicos mais suaves (pasteurização), a temperaturas inferiores a 100 °C (LEITÃO, 1980).

A capacidade tampão de alguns sucos permite a ocorrência de grandes variações na acidez titulável, sem variações apreciáveis no pH mas numa faixa de concentração de ácidos entre 2,5 e 0,5%, o pH aumenta com a redução da acidez, sendo utilizado como indicativo desta variação. Uma pequena variação nos valores de pH é bem detectável nos testes sensoriais (CHITARRA & CHITARRA, 1990).

GUIMARÃES (2000) observou que os valores referentes ao pH de polpa de manga armazenada durante 90 dias, nas temperaturas de -11 °C e -21 °C, permaneceram estáveis quando submetidos ou não a tratamento térmico.

2.2.2 - Sólidos solúveis totais (°Brix)

Os sólidos solúveis totais indicam a quantidade, em grama, dos sólidos que se encontram dissolvidos no suco ou polpa. Sempre são expressos em °Brix e têm tendência à aumentar, com a maturação. Os sólidos podem ser medidos no campo ou na indústria, com auxílio de refratômetro (CHITARRA & CHITARRA, 1990). Utilizado como indicativo da concentração de polpa de frutas também indica o estado de maturação dessa fruta. Com o amadurecimento da fruta o amido é hidrolisado em açúcares complexos e os

açúcares complexos em simples; com isto, o teor de sólidos solúveis das frutas se vai elevando (CARVALHO et al., 1990). Na indústria, a análise do °Brix, teor de sólidos solúveis totais, tem grande influência no controle dos ingredientes a serem acrescentados ao produto e na sua qualidade final. A determinação do °Brix, teor de sólidos solúveis totais, é utilizada nas indústrias de doces, sucos, néctar, polpas, leite condensado, álcool, açúcar, sorvetes, licores e bebidas em geral, além de outros.

2.2.3 – Atividade de água (a_w)

Segundo AZEREDO et al. (2004), o conceito termodinâmico da atividade de água (a_w) é definido como a relação entre a pressão parcial de vapor da água contida no alimento e a pressão da água pura, na mesma temperatura, com a escala da a_w variando de 0 a 1.

A atividade de água é um padrão inteiramente ligado à umidade do alimento, o que permite determinar sua capacidade de conservação, de propagação microbiana. A atividade de água de um alimento, pode ser reduzida aumentando a concentração de solutos na fase líquida dos alimentos mediante a extração da água ou mediante a adição de novos solutos. A atividade de água junto a temperatura, o pH e o oxigênio, são os fatores que mais influenciam na estabilidade dos produtos alimentícios

A presença da água num produto pode ser medida por diferentes formas mas nem sempre todos os métodos indicam a disponibilidade da água para os micro-organismos, uma vez que nem toda água do produto está totalmente disponível. A disponibilidade da água em materiais higroscópicos, tais como frutas e derivados, é mais bem indicada pela atividade de água (a_w), ou pela umidade de equilíbrio com a umidade relativa do ar ambiente (CORREA et al., 2001). Desta forma, é possível estabelecer a relação estreita entre o teor de água livre no alimento e sua conservação (MOHSENIN, 1980). A determinação da atividade de água é uma das medidas mais significativas no processamento, no armazenamento e nas análises dos materiais biológicos, em virtude da importância, no que diz respeito à qualidade e estabilidade (PARK et al., 2001).

2.2.4 - Umidade

A água é uma substância química universal, presente em todos os alimentos, contribuindo para suas propriedades físicas e para diversas mudanças que podem ocorrer.

A água é fator estrutural, um reagente em processos hidrolíticos, um solvente ou um agente de dispersão (CASTRO et al., 1998). A água em quantidade, localização e estrutura adequada é essencial para o processo vital, influencia na textura, na aparência, no sabor e na deterioração química e microbiológica dos alimentos. Quanto maior o teor de água de um alimento, maior também é sua sensibilidade à deterioração (RIBEIRO & SERAVALLI, 2004).

De acordo com ATHIÉ et al. (1998), os conteúdos de umidade nos quais ocorre um aumento expressivo na taxa respiratória, estão próximos daqueles nos quais o aquecimento e a deterioração se iniciam no armazenamento.

2.2.5 - Sólidos totais

A determinação de sólidos totais é essencial, ressaltando que a quantidade de matéria seca que serve para comparar o valor nutritivo de dois ou mais alimentos e dá idéia de preservação (CECCHI, 1999). Os sólidos totais são obtidos pela diferença entre o peso total da amostra e o teor de umidade. Muitos componentes físico-químicos são indicadores de qualidade nos alimentos, entre eles os sólidos totais. EL BULK et al. (1997) estudaram as mudanças na composição química de goiaba de quatro cultivares e constataram que todas as cultivares apresentaram aumento do conteúdo de sólidos totais com o desenvolvimento e amadurecimento da fruta. Segundo AHMED et al. (2005), dentre os fatores que afetam o comportamento reológico de purês de frutas se incluem sólidos totais, sólidos solúveis totais, tamanho das partículas e temperatura.

2.2.6 - Cinzas

As cinzas constituem a fração mineral dos alimentos. Portanto, são formadas pelos micro e macronutrientes os quais possuem relação direta com o solo em que o vegetal foi cultivado e o fruto desenvolvido. Em produtos vegetais, a determinação de cinzas tem relativamente pouco valor, pois o teor de cinzas nesses produtos oferece pouca informação sobre sua composição, uma vez que seus componentes minerais são muito variáveis e tal determinação fornece, em geral, apenas uma indicação da riqueza da amostra nos referidos elementos (SILVA et al., 1990).

Cinzas em alimento se refere ao resíduo inorgânico remanescente da queima da matéria orgânica, sem resíduo de carvão. A composição da cinza obtida não corresponde,

necessariamente, à soma das substâncias minerais presentes no alimento em si, devido às perdas por volatilização ou mesmo pela interação entre componentes. O perfil da cinza pode ser considerado medida geral de qualidade e frequentemente é utilizado como critério na identificação dos alimentos. A cinza contém, em geral, cálcio, magnésio, ferro, fósforo, chumbo, sódio e outros componentes minerais (ANGELUCCI et al., 1987).

2.2.7 - Análise de cor

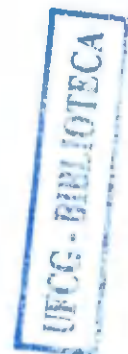
A cor dos alimentos é um importante atributo na qualidade, não só servindo de base para identificação e aceitação de grandes variedades de produtos, mais também influenciando, negativamente ou positivamente na percepção dos demais atributos sensoriais (PONTES, 2004).

Os principais instrumentos utilizados na medição da cor são os colorímetros e os espectrofotômetros. O método proposto pela CIE (Comissão Internaonal de L'Eclairage), definido em 1976, baseia-se, num espaço tridimensional de modo que cada cor é representada por um único ponto nesse espaço, e definido pelas coordenadas L^* , a^* e b^* . O eixo L^* representa a luminosidade numa escala de 0 (preto) a 100 (branco). O eixo a^* representa uma escala de tonalidade de vermelho (+ a) a verde (- a) e eixo b^* representa uma escala de tonalidade de amarelo (+ b) a azul (- b) (BILLMEYER & SALTZMANN, 1981).

2.3 - Reologia

Segundo LIRA (2001), a reologia é o estudo da deformação e do escoamento de materiais, que pode ser expressa como o estudo da relação entre o esforço aplicado e a deformação que sofre o dito material. Para VAN WAZEN et al. (1963), reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento da matéria, através da aplicação de forças mecânicas sobre ela. E, de acordo com TOLEDO (1991), reologia é definida como a ciência que estuda a resposta de um material à aplicação de uma tensão ou deformação.

De acordo com BARNES (1989) e STEFFE (1996) o estudo das propriedades reológicas de alimentos é importante para o projeto de tubulações e equipamentos, e no controle de qualidade, além de proporcionar um entendimento melhor do comportamento estrutural dos produtos. A reologia desempenha papel fundamental no desenvolvimento, fabricação e processamento de produtos alimentícios (SHARMA et al., 2000).



Reologicamente os fluidos são divididos em duas principais categorias: os newtonianos e os não-newtonianos, através da análise da relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação para condições de temperatura e pressão estabelecidas (CONCEIÇÃO, 2000).

2.3.1 - Fluidos newtonianos

Fluidos para os quais a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional a taxa de deformação são denominados fluidos newtonianos (FOX & McDONALD, 1981).

De acordo com CASTRO et al. (2001) e HOLDSWORTH (1993), os fluidos newtonianos são aqueles que apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, ou seja, a viscosidade é constante, independente da taxa de deformação e da tensão de cisalhamento inicial.

A equação da representação matemática do comportamento reológico dos fluidos newtonianos é a Equação 2.2: .

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

em que:

τ - tensão de cisalhamento, Pa;

η - viscosidade, Pa s;

$\dot{\gamma}$ - taxa de deformação, s⁻¹.

Exemplo de alguns alimentos que se comportam como fluidos newtonianos, são sucos de frutas clarificados, soluções de sacarose, a maioria dos méis, xaropes de milho, etc. (RAO & RIZVI, 1994; GONÇALVES, 2000).

2.3.2 - Fluidos não-newtonianos

O termo não-newtoniano é usado para classificar todos os fluidos nos quais a tensão de cisalhamento não é linearmente proporcional a taxa de deformação (FOX & McDONALD, 1981). Para fluidos não-newtonianos o termo viscosidade é substituído por η_a que é a viscosidade aparente e é função do gradiente de velocidade (VIDAL et al., 2000). A viscosidade desses fluidos depende não somente da tensão de cisalhamento, mas

também, do tempo de escoamento, sendo divididos em tixotrópicos (maionese, iogurte) e reopéticos (SUGAI, 2002). Muitos dos fluidos não-newtonianos podem ser descritos pela relação abaixo, em que a viscosidade aparente η_a é função da taxa de deformação (Equação 2.3)

$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.3)$$

Em que:

η_a - viscosidade aparente (Pa s);

τ - tensão de cisalhamento (Pa);

$\dot{\gamma}$ - taxa de deformação (s^{-1}).

2.3.2.1 - Fluidos independentes do tempo

Fluidos independentes do tempo são aqueles em que a viscosidade depende somente da tensão de cisalhamento e são chamados pseudoplásticos, dilatantes e plásticos de Bingham. Para outros pesquisadores os fluidos, independentes do tempo, são divididos apenas em pseudoplásticos e dilatantes (MULLER, 1973; RAO & RIZVI, 1994).

2.3.2.1.1 - Fluidos pseudoplásticos

De acordo com BARNES et al. (1989) fluidos pseudoplásticos são substâncias que, em repouso, apresentam suas moléculas em estado desordenado e quando submetidas a uma tensão de cisalhamento, suas moléculas tendem a se orientar na direção da força aplicada. Quanto maior esta força, maior também será a ordenação e, conseqüentemente, menor será a viscosidade aparente. Para RAO & RIZVI (1994), os fluidos pseudoplásticos são aqueles em que a viscosidade aparente, a uma temperatura constante, depende apenas da taxa de deformação.

O comportamento pseudoplástico pode ser observado em muitos alimentos, em especial polpas e sucos de frutas, como bem atestaram GOMES et al. (2001) estudando suco de acerola; CONCEIÇÃO (2000) trabalhando com polpa de goiaba; VITALI & RAO (1982) com suco concentrado de laranja; bem como, FITO et al. (1983) em estudos de concentrado de tomate.

2.3.2.1.2 – Fluidos dilatantes

Nos fluidos dilatantes a viscosidade aparente aumenta com o aumento da taxa de deformação, o oposto do pseudoplástico. De acordo com SHAW (1992) este comportamento se deve ao efeito da dilatação da polpa de manga com a água, sendo suficiente apenas para preencher os vazios.

Os fluidos dilatantes são raramente encontrados, sendo o mel de abelha o exemplo mais notório. PEREIRA et al (2003), estudaram o comportamento reológico do mel de abelha urucu (*Melipona scutellaris*, L.) nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C e verificaram comportamento reológico de fluido dilatante, neste produto. Também foi constatado este comportamento em estudos realizados por DIK & ÖZILGEN (1994) na farinha de milho, goma e soluções de açúcar.

2.3.2.2 – Fluidos dependentes do tempo

Fluidos dependentes do tempo (fluidos de Boltzmann) são os fluidos cuja taxa de deformação depende da magnitude e da duração da tensão de cisalhamento. O intervalo de tempo entre sucessivas ações cisalhantes também pode ser afetado pela taxa de deformação. Normalmente, os fluidos dependentes do tempo são divididos em dois grupos: fluidos tixotrópicos e reopéticos, dependendo se a tensão de cisalhamento diminui ou aumenta com o tempo, respectivamente (HOLDSWORTH, 1971; MULLER, 1973). Segundo FERREIRA (2008), a dependência do tempo em fluidos não newtonianos é observada com certa frequência. Como previsto, o tempo, variável adicional, condiciona a análise. Um índice de comportamento reológico dependente do tempo de um fluido é a observação da chamada curva de histerese.

2.3.2.2.1- Fluidos tixotrópicos

De acordo com DARLEY & GRAY (1988), nestes fluidos a viscosidade decresce com o tempo enquanto são submetidos a um cisalhamento constante.

Conforme GONÇALVES (1989), como exemplo de produtos alimentícios considerados tixotrópicos, temos: suco de maçã com polpa, suco concentrado de maracujá, alguns méis de abelha, leite condensado e açucarado, clara de ovo e maionese.

2.3.2.2.2- Fluidos reopéticos

São os fluidos em que ocorre aumento de viscosidade aparente com a tensão de cisalhamento; após o repouso tendem a retornar ao comportamento reológico inicial (CHOI & YOO, 2004). De acordo com SHARMA et al. (2000), este tipo de comportamento não é comum em alimentos mas pode ocorrer em soluções de amido altamente concentrados, durante longos períodos de tempo.

2.3.2.3- Fluidos viscoelásticos

Alguns fluidos demonstram propriedades viscosas e elásticas, razão pela qual são denominados fluidos viscoelásticos. Segundo HOLDSWORTH (1971), nesses fluidos observa-se um reestabelecimento elástico quando a tensão de cisalhamento é removida do material. De acordo com BRAGA (2002), a maior parte dos alimentos se comporta como material viscoelástico, ou seja, dependendo da tensão e da escala de tempo aplicadas um corpo sólido pode apresentar propriedades da fase líquida e um material líquido pode mostrar propriedades de corpo sólido.

Tais materiais são bem representados em alimentos com características viscosas, embora a maioria dos modelos para interpretação da deformação e escoamento tem sido aplicada a produtos sólidos, como batatas e maçãs. Nata de leite é um exemplo de alimento viscoelástico (Prentice citado por RAO & RIZVI, 1994).

2.4 - Reometria

Reometria é a determinação experimental do comportamento de escoamento (fluxo) e das propriedades viscoelásticas de materiais; este comportamento pode ser determinado utilizando-se viscosímetros e/ou reômetros.

Conforme STEFFE (1996), os reômetros são instrumentos capazes de medir propriedades reológicas de alimentos fluidos e semi-sólidos, enquanto os viscosímetros são aparelhos mais simples e só medem a viscosidade. RAO & RIZVI (1994) reportam que vários instrumentos são empregados para medir as propriedades reológicas através de métodos fundamentais, alguns estão disponíveis comercialmente, muitos deles foram projetados para uso em diferentes materiais, inclusive muitos dos fluidos alimentícios. O termo viscosímetro é usado para instrumentos que fornecem informações sobre a

viscosidade enquanto o termo reômetro é tido para instrumentos que fornecem maior número de informações. Os autores mencionam, ainda, alguns exemplos, como viscosímetro de fluxo capilar, de cone-placa, de placas paralelas e viscosímetros de fluxo de Couette (cilindro concêntrico) além de outros.

2.4.1 - Modelos reológicos

A descrição do comportamento reológico dos materiais é feita através de modelos que relacionam como a tensão de cisalhamento varia com a taxa de deformação; dentre os modelos matemáticos existentes alguns dos mais aplicados para sistemas de alimentos são: Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), Plásticos de Bingham, Herschel-Bulkley e Casson (TONELI et al., 2005). Conforme BEZERRA (2000), os modelos reológicos são importantes para relacionar as propriedades reológicas de um fluido com grandezas práticas, como concentração, temperatura, pH, índice de maturação etc; tal conhecimento é indispensável no controle de qualidade, controle intermediário em linhas de produção e no projeto e dimensionamento de equipamentos e processos, enquanto esses modelos podem ser isotérmicos ou não-isotérmicos. No primeiro caso descrevem o comportamento do fluido numa temperatura fixa; no último, incluem relações específicas, como funções da temperatura e, dependendo do modelo utilizado, possuem ou não tensão inicial.

2.4.1.1 - Modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência)

BRANCO & GASPARETTO (2003) adotaram o modelo reológico de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência) na caracterização reológica de misturas ternárias de polpa de manga e sucos de laranja, por se ajustar bem aos dados experimentais e ser um modelo simples e de ampla aplicação. Segundo PELEGRINE et al. (2002) o modelo de Ostwald-de-Waele é um dos mais usados com dois parâmetros; é utilizado para demonstrar o efeito do material em suspensão e é descrito conforme a Equação 2.4:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2.4)$$

em que:

τ - tensão de cisalhamento (Pa);

$\dot{\gamma}$ - taxa de deformação (s^{-1});



K - índice de consistência (Pa sⁿ);

n - índice de comportamento do fluido (adimensional).

JUSZCZAK et al. (2004), estudaram as propriedades reológicas de mostardas comerciais ajustadas com o modelo da Lei da Potência e notaram que esse modelo teve excelente ajuste aos dados experimentais, apresentando valores de $R^2 > 0,98$; todavia ele não leva em conta a tensão inicial.

2.4.1.2 - Modelo de Casson

RAO & RIZVI (1994) citam que o modelo de Casson tem sido usado para alimentos e, particularmente, para estimar a tensão inicial. Esses mesmos autores reportam que o modelo de Casson tem sido adotado como método oficial, pelo "International Office of Cocoa and Chocolate", para interpretação do comportamento reológico de chocolate. De acordo com HOLDSWORTH (1971) o modelo de Casson foi desenvolvido para fluidos não tixotrópicos e com suspensão de partículas. Este modelo é representado pela Equação 2.5.

$$\tau^{0,5} = K_{0C} + K_C \dot{\gamma}^{0,5} \quad (2.5)$$

Em que :

τ - tensão de cisalhamento (Pa^{0,5})

$\dot{\gamma}$ - taxa de deformação (s⁻¹)^{0,5}

$K_{0C}^2 = \tau_{0C}$ - tensão de cisalhamento inicial (Pa)

K_C - viscosidade plástica de Casson (Pa s)

2.4.1.3 – Modelo de Herschel-Bulkley

O modelo de Herschel-Bulkley é uma forma modificada do modelo da Lei da Potência; o que diferencia um do outro é a presença ou ausência do termo da tensão de cisalhamento inicial (RAO & COOLEY, 1982). SHARMA et al. (1996) estudaram as propriedades reológicas de polpa de tomate e verificaram que este modelo se ajustou satisfatoriamente aos dados de tensão de cisalhamento, versus taxa de deformação. Esse

modelo é representado pela Equação 2.6:

$$\tau = \tau_{0H} + K_H \dot{\gamma}^{n_H} \quad (2.6)$$

Em que :

τ - tensão de cisalhamento (Pa)

$\dot{\gamma}$ - taxa de deformação (s^{-1})

τ_{0H} - tensão de cisalhamento inicial (Pa)

K_H - índice de consistência ($Pa s^n$)

n_H - índice de comportamento do fluido (adimensional)

2.5 – Propriedades termofísicas

O conhecimento das propriedades termofísicas é essencial para o projeto eficiente e econômico de operações de processamento de alimentos envolvendo transferência de calor (MOURA et al., 2003; INCROPERA & DEWITT, 2003).

Para as matérias-primas destinadas à industrialização, que estão sujeitas aos processos de aquecimento e resfriamento como, por exemplo, polpa de frutas, é interessante que se determinem suas propriedades termofísicas (ARAÚJO et al., 2004).

Segundo MOURA et al. (2003), há necessidade de se conhecer as propriedades térmicas com precisão, estudando-se a influência da composição e da temperatura nessas propriedades.

Hoje, grandes quantidades de dados das propriedades termofísicas estão disponíveis na literatura; para produtos similares não são adequados, na maioria das vezes, para os produtos de origem brasileira. A falta de conhecimento de algumas dessas características e de como elas se comportam diante de variações de temperatura, pode levar a um processamento inadequado do produto, causando prejuízos que poderiam ser evitados. A indústria de sucos tropicais no Brasil sofre com a ausência de dados que sirvam como base para estudos de dimensionamento de processamentos térmicos.

2.5.1 – Massa específica

A massa específica de uma substância é definida como a massa por unidade de volume é expressa no sistema internacional de unidade em kg/m^3 (MUNSON et al., 1997).

Segundo LIMA et al. (2003), que estudaram as propriedades termofísicas da polpa de umbu, afirmaram que a massa específica aumentou com o aumento da concentração e diminuiu com o aumento da temperatura, variando de 1.052,6 kg/m³ na amostra a 10 °Brix a temperatura de 40 °C até 1.159,8 kg/m³ na amostra a 30 °Brix a temperatura de 20 °C. PEREIRA et al. (2002), avaliaram a massa específica de polpa de açaí em três concentrações de sólidos totais (9,7, 12 e 15,2%) e diferentes temperaturas (10 a 50 °C). Neste trabalho os autores observaram decréscimo da densidade com o aumento do teor de água e da temperatura da polpa e propuseram um modelo linear para representar a influência dessas variáveis

Os principais métodos utilizados para determinação da massa específica são os métodos do picnômetro e por flutuação. De acordo com MADRUGA & ALDRIGUE (2002) a determinação da massa específica de alimentos líquidos pelo método do picnômetro é a mais utilizada, pois consiste na medida da massa de um volume conhecido do líquido em um frasco (picnômetro) cujo volume seja calibrado em termos da massa de água pura no mesmo frasco e na mesma temperatura.

A massa específica de determinado produto é a relação da massa por unidade de volume de uma substância, em uma determinada temperatura (Equação 2.7).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.7)$$

em que:

ρ - massa específica (kg/m³)

v - volume (m³)

m - massa (kg)

A massa específica é um parâmetro importante para compreender o poder de solvatação de uma substância, nas diversas fases do solvente. A substância sofre influência direta da pressão e temperatura, aumentando com o aumento da pressão a temperatura constante e diminuindo com o aumento da temperatura, a pressão também constante (QUEIROZ, 1993). Segundo SILVA et al. (1990) a massa específica serve para a caracterização, identificação e utilização de substância ou de materiais, sendo que muitos processos químicos, como fermentação, são controlados através da medida desta propriedade termofísica. A medida da massa específica pode ser aplicada para a determinação da concentração de soluções puras de açúcar em produtos açucarados, de

álcool em bebidas alcoólicas, de sólidos solúveis em suco de tomate e em leite, de adulterações e textura de frutas (CECCHI, 1999). Os dados da massa específica são necessários para projetar e avaliar equipamentos de processamento de alimentos, tais como evaporadores, bombas, filtros e misturadores, e servem ainda como índice de qualidade do produto final (ALVARADO & ROMERO, 1989). A massa específica de partículas sólidas de alimentos pode ser determinada pelo deslocamento de ar ou deslocamento de líquidos (MOHSENIN, 1980). De acordo com Browne citado por RAPUSAS & DRISCOLL (1995), a utilização do método de deslocamento de líquido tem a vantagem de requerer equipamentos simples e de fácil acesso em laboratórios.

A determinação da massa específica em picnômetros é baseada na medida da massa da amostra em recipiente de volume conhecido, fornecendo resultados precisos, que são construídos e graduados de modo a permitir a pesagem de volumes exatamente iguais de líquidos, a dada temperatura. Da relação estabelecida entre as massas e os volumes resulta a massa específica dos mesmos a temperatura de determinação (BRASIL, 2005).

Existe na literatura uma grande quantidade de equações para a predição da massa específica de alimentos em função da temperatura, concentração, umidade e outros parâmetros

Tabela 2.1 - Equações para estimar a massa específica de sucos e polpa de frutas

Produto	Referência	Equação
Alimentos em geral	CHOI&OKOS (1986)	$\rho = 1098 + 4,26 X_s - 0,349 (T + 273)$
Sucos de frutas em geral	ALVARADO & ROMERO (1989b)	$\rho = 1002 + 4,61 B - 0,460 T + 7,001 \times 10^{-3} T^2 - 9,175 \times 10^{-5} T^3$

Em que: ρ - densidade (kg/m^3); X_s - fração mássica dos sólidos (adimensional); B - Sólidos solúveis totais (°Brix); T - temperatura (°C).

2.5.2 – Calor específico

O calor específico (Equação 2.8) é a quantidade de calor que ganha ou perde uma dada massa de produto para sofrer uma determinada mudança de temperatura. Portanto, conhecer o calor específico de uma substância é de fundamental importância para determinar a quantidade de energia que se deve adicionar ou remover no processamento,

dando uma indicação de gastos energéticos o que, em um processamento contínuo, tenderá a influenciar o tamanho do equipamento (SILVA, 2008).

$$C_p = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (2.8)$$

em que:

C_p – calor específico (kJ/kg K);

Q – quantidade de calor (kJ);

m – massa (kg);

ΔT – variação de temperatura (K).

O calor específico indica quanto calor é requerido para mudar a temperatura da unidade de massa de um material, ou seja, representa apenas o calor sensível (SILVA, 1997).

Vários métodos têm sido utilizados para medir o calor específico (RAHMAN, 1995). Os métodos de calorimetria diferencial de varredura (DSC) e técnicas de misturas, são comumente utilizados. Segundo Wang & Kolbe (1991) citados por LOZANO (2006), as vantagens do DSC é que a medição é rápida e uma pequena amostra pode produzir resultados precisos para produtos homogêneos. De acordo com ALVARADO (2001) no método do calorímetro diferencial de varredura, conhecido como DSC, se mede a energia requerida para estabelecer uma diferença de temperatura igual a zero entre o alimento e o material de referência, do qual se calcula o calor específico

No método das misturas determina-se a capacidade calorífica do calorímetro, utilizando-se o balanço de calor da Equação 2.9, descrita em SILVA et al. (2002).

$$C_1 m_1 (T_1 - T_3) + C_{cal} (T_1 - T_3) = C_2 m_2 (T_3 - T_2) \quad (2.9)$$

em que:

C_1 e C_2 - calor específico da água (kJ/kg K)

m_1 – massa de água a temperatura ambiente (kg)

m_2 – massa de água refrigerada (kg)

C_{cal} – capacidade calorífica do calorímetro (kJ/K)

O calor específico do produto é determinado utilizando-se a Equação (2.10):

$$m_p C_p (T_4 - T_5) = C_1 m_3 (T_5 - T_3) + C_{cal} (T_5 - T_3) \quad (2.10)$$

em que:

m_p – massa do produto (kg)

C_p – calor específico do produto (kJ/kg K)

C_1 – calor específico da água (kJ/kg K)

m_3 – soma das massas m_1 e m_2

T_4 – temperatura inicial do produto (K)

T_5 – temperatura de equilíbrio (K).

Segundo a literatura, a Equação (2.11) foi desenvolvida por MOHSENIN (1980) para o cálculo do calor específico de produtos alimentícios com altos teores de água.

$$C_p = (0,837 + 3,349 \cdot X_w) \quad (2.11)$$

em que:

C_p - calor específico (kJ/kg K)

X_w - fração mássica da água (adimensional)

De acordo com DICKERSON (1968) tem sido particularmente utilizada uma equação para suco de frutas com conteúdo de água acima de 50%, ou seja, com alto conteúdo de umidade (Equação 2.12).

$$C_p = 1,675 + 2,512 X_w \quad (2.12)$$

em que:

C_p – calor específico (kJ/kg.K)

X_w – fração mássica da água (adimensional)

MUNIZ et al. (2006) verificaram estudando polpa de bacuri em diferentes concentrações, que o calor específico diminuiu com o aumento do teor de sólidos solúveis e a dependência com esta variável pode ser representada por uma relação do tipo quadrática.

LIMA et al. (2003) determinaram as propriedades termofísicas de polpa de umbu com diferentes teores de sólidos e constataram que o calor específico diminuiu com o aumento do teor de sólidos solúveis totais, variando de 3,2 a 3,7 kJ/kg K.

SILVA et al. (2002) determinaram o calor específico de polpas do fruto do cajá encontrando um valor médio de $0,840 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ na temperatura de $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.5.3 – Condutividade térmica

Segundo INCROPERA & DEWITT (2003), a condutividade térmica representa a propriedade que relaciona a taxa com que o fluxo de calor escoou através do material, em função da existência de um gradiente de temperatura. A condutividade térmica de um material é a medida da sua capacidade para conduzir calor; nos alimentos, ela depende principalmente da composição mas, também, da presença de espaços vazios e de sua homogeneidade.

A condutividade térmica é aproximadamente constante para certas substâncias, identificando o número de calorias transferido por unidade de área, perpendicular ao fluxo de calor, para cada grau de diferença de temperatura através da amostra, e inversamente para cada unidade de comprimento na espessura da amostra na direção do fluxo de calor (NEVES, 1991). Esta propriedade varia amplamente com os gases, os líquidos e os sólidos devido às grandes diferenças nos mecanismos de transporte de calor nos três estados (FOUST et al., 1982). Uma das propriedades mais difíceis de se estimar em processos de congelamento, descongelamento e armazenagem a frio, é a condutividade térmica, visto que esta depende fundamentalmente do teor de água.

Na literatura existem vários métodos de se medir a condutividade térmica dos materiais. Esses métodos podem ser classificados em métodos de estado estacionário e métodos de estado não estacionário. Os primeiros são mais fáceis de serem realizados, entretanto, demandam relativamente grande quantidade de tempo para que seja atingido o regime estacionário para a realização da análise (MOURA et al., 2003).

As metodologias baseadas no estado transiente, apesar de serem mais difíceis de serem realizadas, são mais adequadas para alimentos pois as medições são realizadas em poucos minutos, evitando, assim, alterações na amostra, em consequência de sua atividade microbiológica e/ou química já que esses materiais são de natureza biológica (FONTANA et al., 1999). Segundo MOHSENIN (1980), esse método apresenta algumas dificuldades, como: medição da temperatura, localização dos termopares, transferência de calor convectiva em medições em materiais granulares e controle da temperatura na amostra.

A lei fundamental que descreve a condução térmica é a Lei de Fourier para regime permanente, unidirecional (Equação 2.14).

$$q = -k \frac{dt}{dx} \quad (2.14)$$

em que:

q – massa específica de fluxo de calor (kJ/s);

k – condutividade térmica (KW/m K);

dt/dx – gradiente de temperatura (K/m).

O sinal negativo indica que o fluxo está escoando na direção da diminuição do gradiente de temperatura.

Para suco de frutas, Kolarov & Gromov citado por SWEAT (1994) apresentaram a Equação 2.15.

$$K = 0,140 + 0,42 X_w \quad (2.15)$$

em que:

K – condutividade térmica (W/m K);

X_w – fração mássica da água (adimensional).

SHAMSUDIN et al. (2005) avaliaram o efeito da temperatura nas propriedades termofísicas de suco de goiaba, constatando que a condutividade térmica não foi influenciada pela variação da temperatura.

KUROZAWA et al. (2008) determinaram a condutividade térmica do mamão e do caju em função da temperatura e verificaram o aumento da condutividade térmica com aumento da temperatura e do teor de umidade. Para determinação experimental foi utilizado o método da sonda, em regime transiente.

2.5.4 – Difusividade térmica

A difusividade térmica é importante na determinação da evolução de sistemas que sofrem processos de aquecimento ou de resfriamento. Esta propriedade permite prever a velocidade da penetração de calor no interior do alimento, sendo assim de fundamental relevância para o projeto de equipamentos e para o cálculo do processamento térmico. Para alimentos condutivos, a difusividade térmica controla a velocidade de propagação da frente de aquecimento (CARBONERA et al., 2003). No entanto, é conveniente mencionar que a difusividade térmica de um alimento depende da umidade e da temperatura da

amostra, assim como da sua composição e da porosidade; como a temperatura e a umidade do produto podem mudar durante o processamento, a difusividade também é modificada. Muitas vezes, os valores de difusividade térmica são publicados na literatura, sem informar as condições em que os experimentos foram efetuados. É de fundamental importância que a temperatura, a umidade, a massa específica e a porosidade do meio sejam informadas, conforme cada caso em estudo (CARBONERA et al., 2003).

A difusividade térmica pode ser medida diretamente por meio das técnicas de aquecimento transiente (DICKERSON, 1965), da sonda linear de aquecimento controlado com termopar auxiliar (CHOI & OKOS, 1983a) e da técnica de aquecimento transiente por computador (GRAFFNEY et al., 1980).

Uma vez relacionada com a condutividade térmica (k), com o calor específico (C_p) e com a massa específica (ρ), a difusividade térmica é definida matematicamente pela Equação 2.16:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.16)$$

em que:

- α – difusividade térmica (m^2/s);
- k – condutividade térmica ($W/m K$);
- ρ – massa específica (kg/m^3);
- C_p – calor específico ($J/kg K$).

A difusividade térmica é uma propriedade de grande importância para processos de transferência de calor em estado não estacionário, pois estabelece a velocidade com que o calor se difunde no alimento e a relação entre o tempo e a temperatura (NEVES, 1991).

PEREIRA (2001) determinou a difusividade térmica utilizando aparelho baseado no princípio de DICKERSON (1965) (Equação 2.17) que utiliza condições de transferência de calor em regime transiente, requerendo apenas dados de temperatura da amostra que aumentam linearmente com o tempo. A diferença de temperatura que indica a difusividade térmica é invariável com o respectivo tempo, facilitando a análise e a interpretação dos resultados. O método produz dados aplicáveis sobre um intervalo de tempo através do qual a amostra é aquecida, permitindo o cálculo da difusividade térmica através de um único experimento.

$$\alpha = \frac{ARc^2}{4(T_s - T_c)} \quad (2.17)$$

Donde:

α – difusividade térmica (m²/s);

A – taxa constante de aquecimento (K/s);

Rc – raio do cilindro (m);

Ts – temperatura na superfície do cilindro de raio R (K);

Tc – temperatura no centro do cilindro (K).

A difusividade térmica também pode ser determinada matematicamente através da composição do alimento, utilizando-se equações encontradas na literatura. A Equação 2.18 de difusividade térmica proposta por RIEDEL (1969), é uma expressão matemática que inclui o teor de água do alimento (X_w) sendo α_w a difusividade térmica da água na temperatura desejada. De acordo com RIEDEL (1969), a difusividade térmica de alimentos com conteúdo de água maior que 40% é fortemente dependente do conteúdo de água (X_w).

$$\alpha = 0,088 \times 10^{-6} + (\alpha_w - 0,088 \times 10^{-6})X_w \quad (2.18)$$

em que:

α - difusividade térmica (m²/s);

α_w – difusividade térmica da água (m²/s);

X_w – fração mássica da água (adimensional).

Martens (1980) citado por SINGH (2007) propôs a Equação 2.19 de regressão elaborada com o auxílio de 246 valores publicados de difusividade térmica de alimentos, apresentando desvio padrão em torno de $0,014 \times 10^{-7}$ m²/s.

$$\alpha = [0,057363 X_w + 0,000288 (T + 273)] \times 10^{-6} \quad (2.19)$$

em que:

α - difusividade térmica (m²/s);

X_w – fração mássica da água (adimensional);

T – temperatura (K).

Segundo CHAU (2001), é de significativa importância a determinação experimental dos valores da condutividade e da difusividade térmica para o cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor e a taxa de resfriamento durante o processo de resfriamento de produtos hortícolas.



3 - MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e no Laboratório do Curso de Agroindústria do Instituto Federal de Pernambuco, *Campus* Belo Jardim.

3.1 - Matéria-prima

Foram utilizados, como matéria-prima, frutos do mandacaru, colhidos no semiárido do Estado do Rio Grande do Norte, nos municípios de Caicó e Acari. O município de Caicó está localizado na microregião do seridó ocidental com latitude de $6^{\circ}27'33''\text{S}$ e longitude de $37^{\circ}5'25''\text{W}$, enquanto o município de Acari está localizado na microregião do seridó oriental, com latitude de $6^{\circ}26'7''$ e longitude de $36^{\circ}38'33''$.

3.2 - Processamento dos frutos do mandacaru

As etapas do processamento dos frutos do mandacaru estão representadas no fluxograma da Figura 3.1.

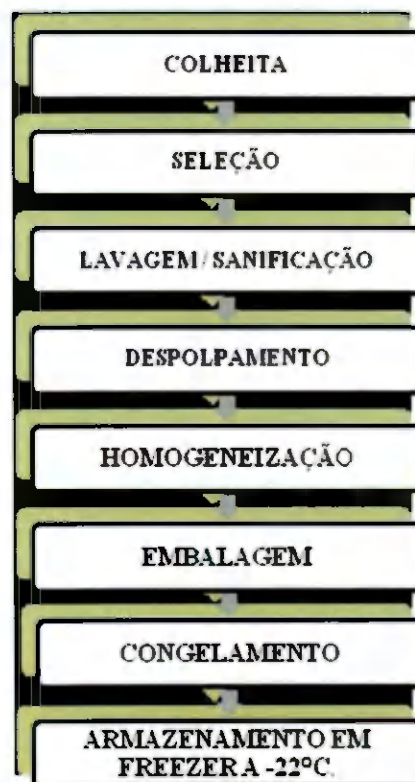


Figura 3.1 - Fluxograma do processamento dos frutos do mandacaru

3.2.1 - Recepção e seleção

Os frutos maduros colhidos foram recebidos e selecionados manualmente, para eliminação dos exemplares danificados e materiais estranhos, a fim de que fossem separados os frutos verdes dos maduros.

3.2.2 - Lavagem

Os frutos selecionados foram pré-lavados em água corrente, com o objetivo de se eliminar terra, sujeiras e resíduos aderidos. Em seguida foram lavados por imersão em solução de hipoclorito de sódio com concentração de 50 ppm, durante 15 minutos, e posteriormente, enxaguados em água corrente e colocados para drenar o excesso de água antes do despulpamento.

3.2.3 - Despulpamento

Os frutos foram abertos separando-se a polpa das cascas, através de corte longitudinal, por facas e colheres higienizadas, sendo as polpas embaladas em sacos de polietileno de baixa densidade e colocadas em freezer a -22 °C. Após o processamento de toda a polpa, a mesma foi submetida ao refinamento por passagem em malha com 1 mm de diâmetro com auxílio de uma prensa hidráulica da marca Skay, com capacidade para 15 ton.

3.2.4 - Embalagem

A polpa integral foi embalada em sacos de polietileno de baixa densidade, com capacidade para 0,5 kg.

3.2.5 - Congelamento

Após a embalagem as amostras foram imersas em nitrogênio líquido a -196 °C, com vista a um congelamento rápido.

3.2.6 - Armazenamento

As amostras congeladas foram armazenadas em freezer com temperatura de -22 °C até o momento da utilização nos experimentos.

3.3 – Preparo das amostras

Para obtenção das polpas concentradas a 35 e 56 °Brix, a polpa integral (12 °Brix) era descongelada e concentrada em evaporador rotativo, marca Quimis modelo Q344B2, sob vácuo, na temperatura de 60°C.

3.4- Caracterização química, física e físico-química

3.4.1 - Sólidos solúveis totais

O teor dos sólidos solúveis totais (°Brix) foi determinado através da leitura direta em refratômetro tipo Abbe, marca Atago, segundo metodologia recomendada pelo Instituto Adolfo Lutz (BRASIL, 2005).

3.4.2- Sólidos totais e umidade

Os sólidos totais e a umidade da polpa do mandacaru foram determinados em estufa a 70 °C, até peso constante, seguindo-se as normas do Instituto Adolfo Lutz (BRASIL, 2005).

3.4.3- Atividade de água

Foi determinada através de equipamento denominado Aqua Lab. As determinações foram realizadas em triplicata a 20 °C.

3.4.4- Cinzas

As cinzas foram determinadas em mufla a 525 °C. Este método é fundamentado na perda de peso, que ocorre quando o produto é incinerado a 525 °C, com destruição da

matéria orgânica, sem apreciável decomposição dos resíduos minerais ou perda por volatilização.

3.4.5 - Análise de cor

A análise de cor foi realizada em triplicata, em espectrofotômetro portátil Hunter Lab Mini Scan XE Plus, modelo 4500 L, no sistema de cor L^* , a^* e b^* , em que L^* é a luminosidade, a^* a transição da cor verde ($-a^*$) para a cor vermelha ($+a^*$) e b^* a transição da cor azul ($-b^*$) para a cor amarela ($+b^*$). As leituras foram feitas com luminosidade D65, ângulo de observação de 10° e calibração com placa branca.

3.5 – Propriedades reológicas

As medidas reológicas, nas polpas integral e concentradas, foram efetuadas através de um viscosímetro de marca Brookfield, modelo DV-II + Pro.

As leituras dos torques e as viscosidades aparentes foram realizadas nas temperaturas de 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55 e 60 °C, obtidas através de banho termostático. As velocidades de rotação das leituras foram 5; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 120; 140; 160; 180 e 200 rpm. Para converter os dados experimentais em medidas reológicas (tensão de cisalhamento e taxa de deformação), foi utilizada a metodologia proposta por MISTCHKA (1982).

Os modelos reológicos de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência) (Equação 2.4), Casson (Equação 2.5) e Herschel-Bulckey (Equação 2.6), foram ajustados às curvas de tensão de cisalhamento, em função da taxa de deformação (reogramas).

3.5.1 - Influência da temperatura

A influência da temperatura sobre a viscosidade aparente foi avaliada utilizando-se a equação do tipo Arrhenius (Eq. 3.1). As temperaturas em graus Celsius foram transformadas para Kelvin e em seguida, calculado o inverso da temperatura. Os valores inversos em Kelvin, juntamente com a viscosidade aparente (Pa s), correspondentes a cada velocidade de rotação foram plotados no programa Origin Pro. Fez-se a regressão linear destes dados obtendo-se os coeficientes da equação com base nos quais se calculou a energia de ativação.

$$\eta = \eta_0 \exp \left[- \frac{E_a}{RT} \right] \quad (3.1)$$

em que:

η - Viscosidade aparente (Pas)

η_0 - Viscosidade aparente inicial (Pa s)

E_a - Energia de ativação (KJ/g mol)

R - Constante universal dos gases (KJ/mol K)

T - Temperatura (K)

3.6 - Propriedades termofísicas

As propriedades termofísicas foram determinadas na polpa integral (12 °Brix) e nas polpas concentradas (35 e 56 °Brix).

3.6.1 - Massa específica

As massas específicas das polpas integral e concentradas foram determinadas nas temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C, sendo os ensaios realizados em triplicata, utilizando-se picnômetros. Os picnômetros com as amostras foram colocados em banho termostático até atingir a temperatura desejada e pesados em balança analítica. Obteve-se o valor da massa específica através da razão entre a massa da amostra e o volume do picnômetro.

Também estimou-se a massa específica teórica através de equações disponíveis na literatura (Tabela 3.1) para a temperatura de 25 °C.

Tabela 3.1 – Equações utilizadas no cálculo teórico da massa específica da polpa do mandacaru

Produto	Equação	Referência
Alimentos em geral	$\rho = 1098 + 4,26 X_s - 0,349 (T + 273)$	CHOI & OKOS (1986)
Sucos de frutas em geral	$\rho = 1002 + 4,61 B - 0,460 T + 7,001 \times 10^{-3} T^2 - 9,175 \times 10^{-5} T^3$	ALVARADO & ROMERO (1989b)

em que: ρ : massa específica (kg/m^3); X_s : fração mássica dos sólidos (adimensional); T: temperatura ($^{\circ}\text{C}$); B: Sólidos solúveis totais ($^{\circ}\text{Brix}$)

3.6.2 - Calor específico

Os valores do calor específico das polpas integral e concentradas foram determinados, em triplicata, utilizando-se um calorímetro de mistura (Figura 3.2).

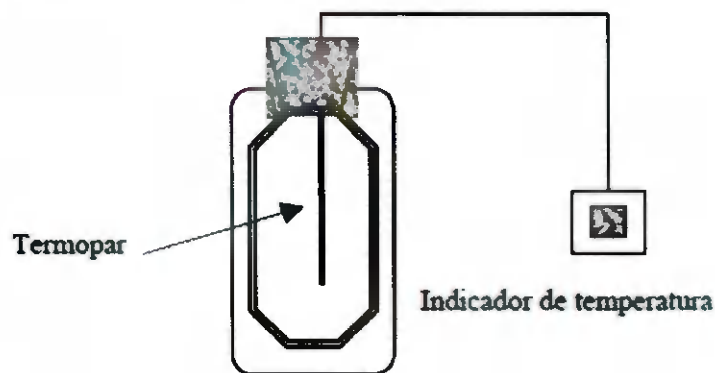


Figura 3.2 – Calorímetro de mistura e medidor de temperatura (Fonte: ARAÚJO et al., 2004)

Este aparato consiste em uma garrafa térmica (frasco Dewar), com capacidade para 1.000 mL, envolvida em camada de 5 cm de isolante térmico (lã de vidro), inserida em uma carcaça de PVC. A garrafa é fechada com rolha de borracha dotada de furo por onde é introduzida a haste de um termopar, com a finalidade de se determinar a temperatura interna.

Inicialmente foi realizada a estabilização da temperatura no interior do calorímetro, adicionando-se água a temperatura ambiente; em seguida, foi determinada a capacidade

calorífica do calorímetro, pesando-se uma massa de água (m_1) de aproximadamente 200g à temperatura ambiente (T_1); logo após, foi adicionada uma massa de água resfriada (m_2) com aproximadamente 200g, em temperatura aproximada de 12 °C (T_2); após agitado lentamente, mediu-se a temperatura interna do calorímetro, registrando-se a temperatura T_3 , no equilíbrio. Na determinação da capacidade calorífica do calorímetro foi utilizada a equação de balanço de calor, através da Equação 3.2.

$$C_1 m_1 (T_1 - T_3) + C_{cal} (T_1 - T_3) = C_2 m_2 (T_3 - T_2) \quad (3.2)$$

em que:

- C_1 e C_2 - calor específico da água (kJ/kg.K);
- m_1 - massa de água a temperatura ambiente (kg);
- m_2 - massa de água refrigerada (kg);
- C_{cal} - capacidade calorífica do calorímetro (kJ/K).

O valor médio da capacidade calorífica do calorímetro foi 112,04 kJ/K. Posteriormente, o calorímetro foi esvaziado e preenchido com água, em temperatura ambiente, a fim de estabilizá-lo. Após o tempo necessário, o calorímetro foi esvaziado e seco para eliminar todos os vestígios de água. Foi-lhe adicionada uma massa de amostra (m_2) de aproximadamente 100 g a temperatura de aproximadamente 12 °C (T_2), e de imediato ± 100 g de água (m_1) em temperatura ambiente (T_1). O calorímetro foi agitado lentamente até se atingir a temperatura de equilíbrio (T_3), verificada pela estabilização da leitura do termopar interno.

Na determinação do calor específico do produto foi utilizada a Equação 3.3:

$$m_p C_p (T_4 - T_5) = C_1 m_3 (T_5 - T_3) + C_{cal} (T_5 - T_3) \quad (3.3)$$

em que:

- m_p - massa do produto (kg)
- C_p - calor específico do produto (kJ/kg K)
- C_1 - calor específico da água (kJ/kg K)
- m_3 - soma das massas m_1 e m_2
- T_4 - temperatura inicial do produto (K)
- T_5 - temperatura de equilíbrio (K).

Além das determinações experimentais foram utilizadas também visando à equações propostas na literatura (Tabela 3.2) para determinação do calor específico teórico.

Tabela 3.2– Equações utilizadas para o cálculo teórico do calor específico das polpas

Produto	Equação	Fonte
Sucos de frutas	$C_p = 1,675 + 2,512 X_w$	DICKERSON (1968)
Geral – produtos alimentícios	$C_p = 0,837 + 3,349 X_w$	MOHSENIN (1980)

em que: C_p – calor específico (kJ/kg.K); X_w – fração mássica da água (adimensional)

3.6.3 - Difusividade térmica

As difusividades térmicas das polpas integral e concentradas foram determinadas, em triplicata, de acordo com a metodologia proposta por DICKERSON (1965). O aparato utilizado consiste em um cilindro metálico com 2,45 cm de raio interno e 23,0 cm de comprimento, com rolhas de nylon nas extremidades para vedação e isolamento térmico. O cilindro é provido de dois termopares, um na superfície externa e o outro inserido através do centro de uma das rolhas, de modo a medir a temperatura no centro radial e em posição equidistante das extremidades. O cilindro foi preenchido com as polpas adicionadas de agar, para evitar a convecção natural; a seguir, mergulha-se o aparato no banho termostático, onde era aquecido até a temperatura de 60 °C, registrando-se as temperaturas na superfície e no centro do cilindro, em intervalos de 1 minuto.

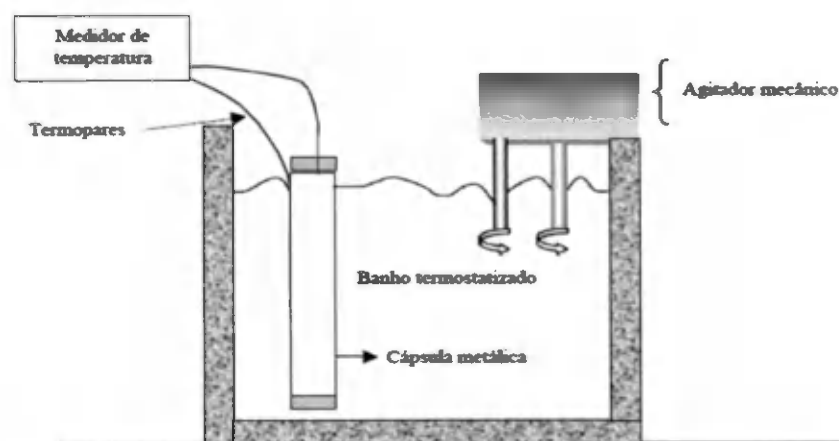


Figura 3.3 -Aparato para determinação da difusividade térmica (Fonte: ARAÚJO et al., 2004)

Para os cálculos da difusividade térmica das polpas foi utilizada a Equação 3.4:

$$\alpha = \frac{AR^2}{4(T_s - T_c)} \quad (3.4)$$

em que:

α – difusividade térmica (m²/s);

A – taxa constante de aquecimento (K/s);

R – raio do cilindro (m);

T_s – temperatura na superfície do cilindro de raio R (K);

T_c – temperatura no centro do cilindro (K).

Para se obter o valor da taxa de aquecimento (A) utilizaram-se os dados de temperatura na superfície do cilindro (T_s) versus tempo, construído com os dados experimentais, por meio do coeficiente angular da reta. Os valores de T_s e T_c foram obtidos quando as curvas (T_s) e (T_c) se tornaram paralelas entre si, o que ocorre quando atendem às condições da Equação 3.5.

$$[(T_s - T_c)_i - (T_s - T_c)_{i+1}] \leq 0,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.5)$$

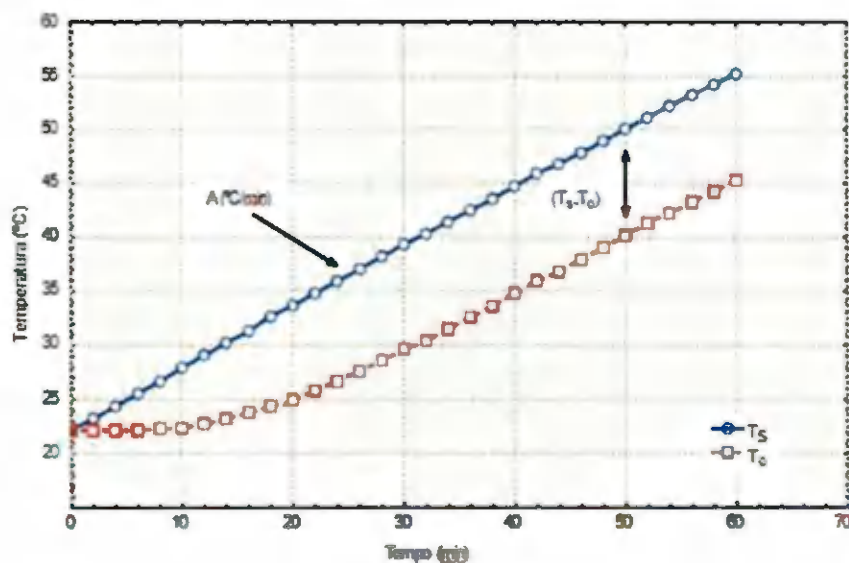


Figura 3.4 - Diagrama da temperatura-tempo para determinação de difusividade térmica.(Fonte: PEREIRA et al., 2001).

Para o cálculo teórico das difusividades térmicas teóricas foram utilizadas as equações apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Equações utilizadas no cálculo teórico da difusividade térmica, das polpas de mandacaru.

Produto	Equação	Referência
Alimentos em geral	$\alpha = 0,088 \cdot 10^{-6} + (\alpha_w - 0,088 \cdot 10^{-6})X_w$	RIEDEL (1969)
Alimentos em geral	$\alpha = [0,057363 X_w + 0,000288 (T + 273)] \times 10^{-6}$	Martens citado por SINGH (2007)

α - difusividade térmica (m^2/s); T - temperatura ($^{\circ}C$); α_w - difusividade térmica da água (m^2/s); X_w - fração mássica da água (adimensional).

3.6.4 - Condutividade térmica

As condutividades térmicas das polpas foram determinadas através da relação entre a difusividade térmica (α), calor específico (C_p) e a massa específica (ρ), expressa conforme a Equação 3.6:

$$k = \alpha \rho C_p \quad (3.6)$$

em que:

k - condutividade térmica (W/m K)

α - difusividade térmica (m^2/s)

ρ - massa específica (kg/m^3)

C_p - calor específico (KJ/kg K)

Para estimativa da condutividade térmica teórica das polpas integral e concentradas foram utilizadas equações teóricas propostas na literatura, apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Equações utilizadas no cálculo teórico da condutividade térmica da polpa de mandacaru

Produto	Fórmula	Referência
Sucos de frutas	$k = 0,140 + 0,42 X_w$	Kolarov & Gromov citado por SWEAT (1994)
Materiais biológicos	$k = 0,056 + 0,57 X_w$	CHOI & OKOS (1986)

K - condutividade térmica (W/m °C); X_w - fração mássica da água (decimal)

3.7 - Análises estatísticas

A análise estatística dos dados experimentais utilizou-se o programa ASSISTAT (SILVA & AZEVEDO, 2002) com comparação entre médias pelo teste de Tukey, com 5% de probabilidade.

3.8 - Erro percentual

Para determinar o erro entre as determinações experimentais das propriedades termofísicas e os valores obtidos por meio de equações propostas em literatura, foi utilizada a Equação (3.7)

$$E = \left| \frac{V_{cal} - V_{exp}}{V_{exp}} \right| \times 100 \quad (3.7)$$

em que:

V_{exp} – valor experimental

V_{cal} – valor calculado



4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Caracterizações química, física e físico-química

Em geral, tipos de solo, fatores climáticos, genéticos, práticas conservacionistas e culturais, exercem influência significativa sobre a composição e qualidade nutricional das frutas. Motivo porque, o conhecimento da composição química, física e físico-química, é de fundamental importância na comparação de dados reológicos e termofísicos.

Na Tabela 4.1, se encontram os valores dos parâmetros químicos, físicos e físico-químicos da polpa do mandacaru nas concentrações de 12 °Brix (polpa integral), 35 °Brix e 56 °Brix (polpas concentradas).

Tabela 4.1 – Valores médios dos parâmetros químicos, físicos e físico - químicos da polpa de mandacaru integral e concentradas

Parâmetro	Polpa iutegral (12 °Brix)	Polpa couc. (35 °Brix)	Polpa conc. (56 °Brix)	Média geral	DMS	CV (%)
Cinzas (%)	0,32 b	1,79 a	1,84 a	1,32	0,28	8,43
pH	4,41	4,85	4,83	-	-	-
Umidade (%)	87,7603 a	60,6489 b	36,6835 c	61,6975	0,5678	0,37
Sólidos totais (%)	12,2397 c	39,3511 b	63,3165 a	38,3024	0,63	0,66
Atividade de água (a_w)	0,990 a	0,948 b	0,849 c	0,929	0,007	0,30
Luminosidade (L^*)	24,07c	26,14a	25,76 b	25,32	0,09	0,14
Intensidade de vermelho (+ a^*)	0,78 c	10,83 a	8,08 b	6,56	0,19	1,14
Intensidade de amarelo (+ b^*)	4,21c	26,08 a	11,33 b	13,87	0,34	0,99

DMS – desvio mínimo significativo; CV – coeficiente de variação. As médias seguidas pela mesma letra nas linhas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Dos valores encontrados para as cinzas observa-se que estatisticamente, não houve diferença entre as amostras concentradas, embora essas amostras tenham apresentado valores superiores, ao da polpa integral, comportamento que se deve à evaporação da água a qual é responsável pela concentração do teor de minerais da amostra. BAHIA et al. (2010) encontraram, estudando as características físico-químicas do fruto do mandacaru (*Cereus jamacaru* P.DC.) cultivado no, sertão Pernambucano, teor de cinzas de 0,4814%, superior portanto, ao da polpa integral do presente estudo.

No que se refere ao pH, pode-se observar que para a polpa integral foi obtido o menor valor de pH, amostra mais ácida, e as polpas com 35 e 56 °Brix apresentaram médias semelhantes e superiores a da polpa integral. Este fato se deve ao aquecimento das amostras concentradas durante a concentração no evaporador rotativo provocando a oxidação dos ácidos orgânicos com conseqüente aumento do pH. ALMEIDA et al. (2009), estudando a caracterização do fruto do mandacaru, encontrou valores próximos de pH, de cerca de 4,38 e 4,50 unidades de pH, para a polpa integral dos frutos colhidos nos municípios de Queimadas, PB, e Alagoa Seca, PB, respectivamente. Com base nos resultados obtidos, pode-se assim classificar, de acordo com BARUFFALDI & OLIVEIRA (1998), a polpa do mandacaru integral como alimento ácido (pH entre 3,7 e 4,5) e as polpas concentradas de alimentos pouco ácidos (pH > 4,5).

Dos valores encontrados para umidade nota-se que as médias diminuíram estatisticamente com o aumento da concentração; relação inversa ocorreu para os sólidos totais. BARBOSA (1998), estudando a caracterização da polpa do fruto do mandacaru integral cita valor médio da umidade próximo, de cerca de 86,57%. O valor encontrado para a polpa integral foi inferior ao constatado por OLIVEIRA et al. (2004), para o mesmo fruto que foi de 93,77% e semelhante ao encontrado por CANUTO et al. (2007), para o fruto da palma de 87,8%.

O teor de sólidos totais das polpas do mandacaru integral e concentradas foi superior ao da polpa do mamão, determinado por GRIZOTTO et al. (2005), que foi de 9,8%. A polpa do bacuri tem teor de sólidos totais 13,754 %. quantificado por MUNIZ (2004), próximo ao da polpa integral do mandacaru.

Para a atividade de água nota-se que a mesma diminuiu estatisticamente com o aumento da concentração, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. VIANA (2010) determinou estudando a polpa do cupuaçu integral, o valor de $0,989 \pm 0,001$ para atividade de água, sendo próximo ao da polpa integral do mandacaru. As polpas integral e concentradas do mandacaru são classificadas como alimentos de alta umidade ($a_w > 0,85$),

as quais são muito propensas a deteriorações microbiológicas em geral (AZEREDO et al., 2004).

Nota-se que os valores de luminosidade e de intensidade de amarelo aumentaram com a concentração apresentando diminuição em 56°Brix; o mesmo comportamento apresentou a intensidade de vermelho, que aumentou entre a polpa integral e as polpas concentradas mas entre estas ocorreu diminuição de valores para a de 56 °Brix. Como a luminosidade varia na escala de 0 (zero), que corresponde ao preto, a 100, que corresponde ao branco, tem-se que a redução de L^* implica em um escurecimento da amostra com o processo de concentração, fato devido à temperatura empregada no processo de evaporação da água.

4.2 - Comportamento reológico

4.2.1 – Modelos reológicos

Na Tabela 4.2 são apresentados os parâmetros de ajuste dos modelos reológicos Lei da Potência, Casson e Herschel-Bulkley ajustados aos dados experimentais da polpa do mandacaru com 12 °Brix (integral). Todos os modelos testados apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,99 e desvios percentuais médios (P) inferiores a 5%, indicando que tais modelos podem ser usados para estimar os dados reológicos da polpa do mandacaru com 12 °Brix. Dentre os modelos testados o que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de Herschel-Bulkley, com os maiores R^2 e menores P.

Para o modelo da Lei da Potência observa-se tendência de diminuição com o aumento da temperatura dos valores do parâmetro índice de consistência (K) entre 5 e 50 °C. Comportamento semelhante foi verificado por CABRAL et al (2002), estudando o comportamento reológico da polpa do cupuaçu, que também descreveram que o aumento da temperatura provocou diminuição do índice de consistência (K). ADORNO (1997) ao estudar a reologia do suco do mamão com concentrações de sólidos solúveis totais entre 10 e 40 °Brix também constatou que o índice de consistência (K) diminuiu com o aumento da temperatura mas aumentou com o conteúdo de sólidos totais.

Tabela 4.2 - Parâmetros, coeficientes de determinação (R^2) e desvios percentuais médios (P) dos modelos reológicos para a polpa do fruto do mandacaru integral (12 °Brix)

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetro			R^2	P (%)
		K	n			
Lei da Potência	5	14,8083	1,4150		0,9996	0,44
	10	12,9604	1,4117		0,9995	0,46
	15	13,3382	1,3727		0,9998	0,30
	20	11,2637	1,4108		0,9999	0,21
	25	11,1097	1,3736		0,9998	0,26
	30	6,6036	1,4434		0,9999	0,37
	35	4,8969	1,5026		0,9985	1,80
	40	5,0879	1,4863		0,9994	0,97
	45	4,9701	1,4802		0,9994	1,02
	50	4,1466	1,5172		0,9995	1,00
	55	4,6348	1,4686		0,9928	0,89
	60	4,3836	1,4678		0,9978	1,65
Casson	Temp. (°C)	K_{oc}	K_c		R^2	P (%)
	5	-9,2657	11,3208		0,9997	0,02
	10	-7,4823	10,4526		0,9988	0,34
	15	-5,5614	9,7276		0,9998	0,13
	20	-6,9748	9,8453		0,9998	0,07
	25	-14,6346	8,9573		0,9997	0,15
	30	-13,7682	8,0346		0,9986	0,85
	35	-13,9078	7,8274		0,9952	1,50
	40	-14,4419	7,8484		0,9972	1,06
	45	-4,1979	7,6820		0,9981	0,82
	50	14,5102	7,6109		0,9973	1,01
	55	13,6564	7,3068		0,9978	0,71
60	-13,0323	7,0513		0,9940	1,25	
Herschel- Bulkley	Temp. (°C)	τ_{OH}	K_H	n_H	R^2	P (%)
	5	276,5158	29,5529	1,2539	0,9997	0,32
	10	222,4205	5,8565	1,6002	0,9997	0,39
	15	-136,1954	20,486	1,2736	0,9999	0,26
	20	-174,0418	19,796	1,2801	0,9999	0,15
	25	29,4014	9,9019	1,4002	0,9998	0,25
	30	7,5280	6,3269	1,4533	0,9999	0,37
	35	104,4703	2,3273	1,6775	0,9993	0,99
	40	59,4827	3,4524	1,5766	0,9995	0,57
	45	19,0853	4,3805	1,5096	0,9994	1,11
	50	46,9135	2,9310	1,5984	0,9996	0,89
	55	56,1514	3,1197	1,5607	0,9994	0,79
60	87,0660	2,2409	1,6225	0,9983	1,79	

O índice de comportamento do fluido (n) do modelo da Lei da Potência sofre uma ligeira oscilação em função da temperatura, sem demonstrar tendência de acréscimo ou de

decréscimo com o aquecimento. Em todas as temperaturas as amostras demonstraram comportamento dilatante ($n > 1$). Contrariamente, SILVA (2005), trabalhando com suco de acerola, citou que o valor do índice de comportamento aumentou com o aumento da temperatura. BOURNE (1994), cita que, para os fluidos dilatantes, a viscosidade aparente aumenta com o aumento da tensão de cisalhamento e esse tipo de fluido é encontrado em líquidos que contém alta proporção de partículas rígidas insolúveis em suspensão. STEFFE (1996) cita, como exemplo de fluidos dilatantes, as dispersões de polímeros ou resinas, concentrados de PVC misturados com líquidos plásticos, além de outros. Alimentos e produtos alimentícios com comportamento dilatante foram constatados por QUEIROZ et al. (2000) para o suco de abacaxi despectinizado e centrifugado, por PEREIRA et al. (2003) para o mel do uruçú nas temperaturas de 30 a 50 °C, por GOMES & PENNA (2009) em algumas bebidas lácteas funcionais na temperatura de 10 °C, dentre outros.

Para o modelo de Casson observa-se, de maneira geral, valores do parâmetro K_{0C} – tensão inicial de Casson – negativos na maioria das temperaturas, indicando que os mesmos não tem significado físico para a presente amostra. Contrariamente, GRANGEIRO et al (2007), estudando o comportamento reológico da polpa do figo da índia, citou, que de maneira geral, observou-se diminuição dos valores do parâmetro K_{0C} com o aumento da temperatura, e aumento desses valores com a elevação da concentração.

A viscosidade plástica de Casson, K_C , foi afetada pelo aumento de temperatura, sofrendo redução nos seus valores. Comportamento inverso obtiveram SILVA et al. (2005) para a polpa de acerola (13 °Brix) ao representarem aumento dos valores do K_C com o aumento da temperatura entre 5 e 85 °C.

Para o modelo de Herschel-Bulkley observa-se que os valores do índice de consistência (K_H) apresentaram tendência de redução entre as maiores e as menores temperaturas. SATO (2007), estudando comportamento reológico da polpa de jabuticaba (13 °Brix) descreveu que ocorreu diminuição nos valores referentes ao parâmetro K_H (índice de consistência), com o aumento da temperatura entre 5 e 85 °C.

Em relação ao índice de comportamento de fluido (n_H), do modelo de Herschel-Bulkley, ocorreram variações entre 5 e 60 °C mas não se detectam tendências relacionadas à temperatura. Constata-se que os valores deste parâmetro foram superiores a um (1)

indicando, mais uma vez, para a polpa do mandacaru integral (12 °Brix), trata-se de um fluido não newtoniano com comportamento dilatante.

Nas Figuras B.1 e B.4 (Apêndice B) tem-se os reogramas da polpa de mandacaru com 12 °Brix com ajustes pelos modelos Lei da Potência e Casson. Na Figura 4.1 estão representadas os dados da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do mandacaru a 12°Brix (polpa integral), obtidas nas doze diferentes temperaturas, com curvas de ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley. Verifica-se, pela posição relativa das curvas, redução na tensão de cisalhamento com o aumento de temperatura. Entre 5 e 15 °C as curvas apresentam uma razão de comportamento, o qual modificado entre 15 e 20 °C e novamente entre 45 a 60 °C. Observa-se, também, que a tensão de cisalhamento aumenta com a taxa de deformação mostrando que, nesta concentração o fluido apresenta características dilatantes. Os valores de tensão de cisalhamento decrescem em todas as amostras com o aumento da temperatura. TELIS-ROMERO et al. (1999), verificaram estudando as propriedades reológicas do suco de laranja, que a tensão de cisalhamento decresceu com o aumento de temperatura.

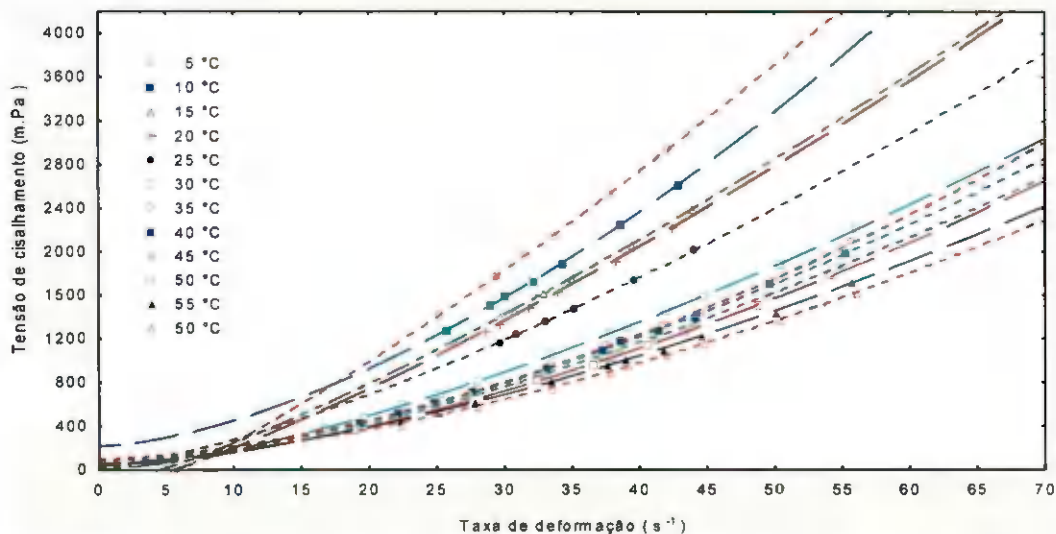


Figura 4.1 - Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do mandacaru, na concentração de 12 °Brix, com ajuste pelo modelo de Herschel Bulkley

Na Tabela 4.3 são apresentados os parâmetros dos modelos reológicos Lei da Potência, Casson e Herschel-Bulkley ajustados aos dados experimentais da polpa do mandacaru com 35, °Brix.

Tabela 4.3 - Parâmetros, coeficientes de determinação (R^2) e desvios percentuais médios (P) dos modelos reológicos para a polpa do fruto do mandacaru com 35 °Brix.

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetro			R^2	P (%)
		K	n			
Lei da Potência	5	3155,9480	0,4329		0,9978	1,91
	10	2911,6756	0,4353		0,9954	2,79
	15	2989,1342	0,3946		0,9866	3,10
	20	2760,8915	0,4066		0,9974	1,99
	25	2451,4928	0,3972		0,9940	2,65
	30	2101,4847	0,3973		0,9939	2,77
	35	1988,8921	0,3851		0,9965	2,82
	40	1825,0681	0,3785		0,9903	3,09
	45	1862,2855	0,3668		0,9903	3,20
	50	1998,7471	0,3396		0,9340	5,18
	55	1845,7398	0,3504		0,9874	3,32
	60	1464,2882	0,3895		0,9934	2,16
Casson	Temp. (°C)	K_{0C}	K_C		R^2	P (%)
	5	59,8907	10,0067		0,9996	1,76
	10	58,3875	9,5550		0,9946	1,39
	15	58,6450	8,3829		0,9748	2,01
	20	56,4560	8,4241		0,9889	1,77
	25	53,9334	7,5354		0,9937	1,26
	30	50,6147	6,8370		0,9942	1,20
	35	48,6813	6,4487		0,9934	1,23
	40	46,8700	5,9745		0,9950	1,05
	45	46,9880	5,8250		0,9925	1,15
	50	48,6353	5,3416		0,9408	2,34
	55	47,1497	5,3260		0,9931	1,13
60	43,3880	5,3971		0,9901	1,30	
Herschel-Bulkley	Temp. (°C)	τ_{0H}	K_H	n_H	R^2	P (%)
	5	1695,4926	2140,1989	0,5050	0,9993	0,67
	10	2570,0255	1451,1205	0,5673	0,9996	0,70
	15	1600,7835	1960,2061	0,4709	0,9880	2,21
	20	1591,4411	1766,6311	0,4882	0,9992	0,84
	25	2148,9337	1145,7711	0,5380	0,9990	1,06
	30	1931,4167	951,9594	0,5422	0,9991	0,82
	35	1766,3173	895,8437	0,5315	0,9984	1,20
	40	1838,2142	697,6653	0,5560	0,9983	1,25
	45	1757,8835	751,3615	0,5320	0,9974	1,56
	50	1378,8559	1049,8436	0,4517	0,9317	4,13
	55	1854,7133	54,9302	0,5381	0,9966	1,64
60	1138,1831	787,4689	0,4995	0,9956	1,68	

Verifica-se que todos os modelos testados apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,93 e desvios percentuais médios (P) inferiores a 6%, sinalizando que esses modelos podem ser usados para estimar os dados reológicos da polpa do mandacaru com 35 °Brix. Dentre os modelos testados o que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de Herschel-Bulkley com os maiores R^2 e menores P.

Para o modelo Lei da Potência observa-se, de maneira geral, que o Índice de consistência, K, de maneira geral, diminui com o aumento da temperatura. Segundo OHATA & VIOTTO (2011) a diminuição de K com o aumento da temperatura implica na diminuição da viscosidade com o aumento da temperatura.

Em relação ao índice de comportamento do fluido, n, não é possível estabelecer relação entre este e o aquecimento. Observa-se que todos os valores de $n < 1$, significam que a polpa do mandacaru com 35 °Brix se trata de um fluido não-newtoniano com características pseudoplásticas. Esta característica é diferente da polpa do mandacaru com 12 °Brix, significando que a concentração modificou as características reológicas da polpa do mandacaru. ALIBERTI (2009) também verificou que a polpa de açaí apresentou comportamento pseudoplástico, para as medidas realizadas entre 20 e 60 °C.

Para o modelo de Casson observa-se que, de maneira geral, houve tendência de diminuição no valor de K_{0C} , que representa a tensão inicial, com o aquecimento. A existência de uma tensão de cisalhamento inicial significa, para a polpa escoar, que é necessária a aplicação de uma tensão inicial. De forma semelhante, o coeficiente de viscosidade plástica, K_C , é afetado pelo aumento de temperatura sofrendo redução nos seus valores. Esta tendência de redução está relacionada com a diminuição da viscosidade com o aumento da temperatura implicando também em uma tensão menor de cisalhamento inicial com o aumento da temperatura. Comportamento semelhante foi encontrado por CABRAL et al. (2002), para a polpa peneirada de cupuaçu nas temperaturas de 10; 15; 20; 25 e 30 °C, em que também foi verificada tendência de redução dos parâmetros do modelo de Casson de K_{0C} e K_C com o aumento da temperatura.

Para o modelo de Herschel-Bulkley não se observa, comumente, diminuição no valor da tensão de cisalhamento inicial (τ_{0H}) com o aumento da temperatura, mas nota-se para o valor de K_H - índice de consistência do modelo de Herschel-Bulkley - alguma tendência de diminuição entre 5 e 60 °C, porém com oscilações em toda a faixa de temperatura. Em relação ao coeficiente n_H - índice de comportamento do fluido do modelo de Herschel-Bulkley - não é possível relacioná-lo com a temperatura mas como $n < 1$ confirma-se também a característica pseudoplástica. MASSA et al. (2010) também

constataram, através do modelo de Herschel-Bulkley, comportamento pseudoplástico para os purês de pêsego com 11,9 e 21 °Brix e temperaturas entre 5 e 55 °C, além da redução de K_H com o aumento da temperatura.

Nas Figuras B.2 e B.5 (Apêndice B) tem-se os reogramas da polpa de mandacaru com 35 °Brix com ajustes pelos modelos de Lei da Potência e de Casson. Na Figura 4.2 estão representadas as curvas de ajuste do modelo de Herchel-Bulkley aos dados de tensão de cisalhamento versus taxa de deformação, obtidas nas doze diferentes temperaturas para a polpa do mandacaru a 35 °Brix, considerado o melhor modelo para estimar os dados reológicos. Observa-se que ocorre redução na tensão de cisalhamento com o aumento de temperatura, para uma taxa de deformação fixa significando, também, que a viscosidade diminui com o aumento da temperatura. Os valores de tensão de cisalhamento decrescem em todas as amostras com o aumento da temperatura. CONCEIÇÃO (2000) descreve este mesmo comportamento para polpa de goiaba tratada com pectinase.

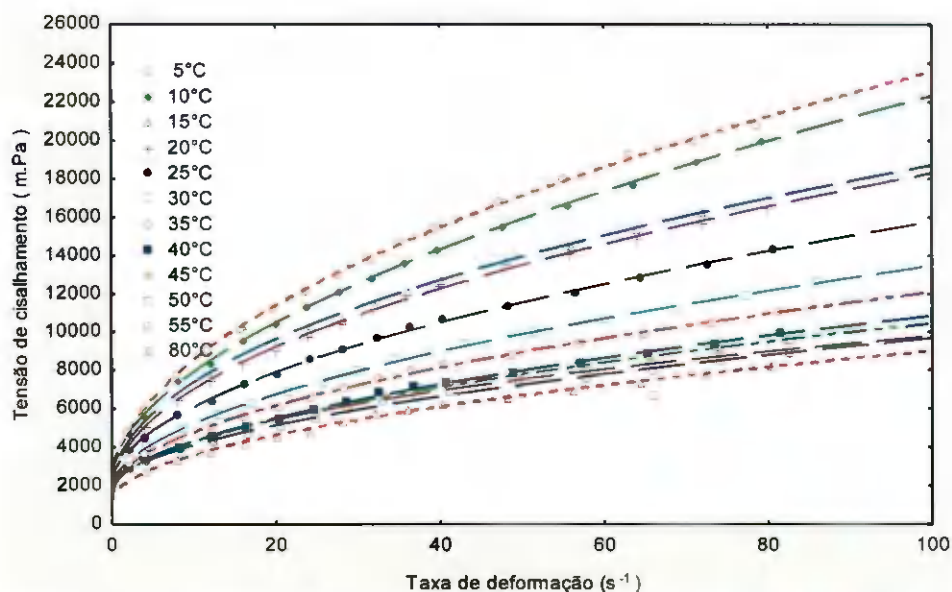


Figura 4.2 - Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do mandacaru, na concentração de 35 °Brix, com ajuste pelo modelo de Herchel Bulchey

Na Tabela 4.4 são apresentados os parâmetros de ajustes dos modelos reológicos Lei da Potência, Casson e Herschel-Bulkley aos dados experimentais da polpa do mandacaru com 56 °Brix.

Tabela 4.4 - Parâmetros, coeficientes de determinação (R^2) e desvios percentuais médios (P) dos modelos reológicos para a polpa do fruto do mandacaru com 56 °Brix

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetro			R^2	P (%)
		K	n			
Lei da Potência	5	4261,8210	0,3347		0,9971	1,58
	10	32858,6922	0,3269		0,9956	2,81
	15	27520,2110	0,3346		0,9926	3,61
	20	29776,9888	0,3246		0,9961	2,54
	25	25175,1715	0,3482		0,9949	3,47
	30	20985,8688	0,3242		0,9920	3,92
	35	18282,0649	0,3124		0,9958	2,98
	40	18125,1701	0,3056		0,9868	3,85
	45	20332,9944	0,3072		0,9935	3,28
	50	14583,0897	0,2894		0,9930	3,15
	55	14918,9707	0,2771		0,9940	2,70
	60	14651,7019	0,2826		0,9976	1,64
Casson	Temp. (°C)	K_{oc}	K_c		R^2	P (%)
	5	154,4912	34,6277		0,9857	2,31
	10	155,8632	31,2861		0,9903	1,92
	15	149,0652	26,5713		0,9873	2,23
	20	148,8694	28,9304		0,9764	2,76
	25	144,3561	25,8567		0,9812	2,88
	30	142,8855	18,4961		0,9690	3,61
	35	133,7018	16,3244		0,9759	2,96
	40	133,0723	15,7903		0,9663	2,94
	45	131,5681	19,7804		0,9803	2,61
	50	120,3229	13,0342		0,9785	2,56
	55	121,5658	12,5102		0,9748	2,66
60	119,3749	12,8810		0,9619	3,44	
Herschel-Bulkley	Temp. (°C)	τ_{ou}	K_{II}	n_{II}	R^2	P (%)
	5	12471,4023	22453,1897	0,4300	0,9997	1,02
	10	15885,1300	18131,5059	0,4585	0,9999	0,28
	15	14352,5339	14939,7551	0,4616	0,9973	1,00
	20	9126,6422	21312,2477	0,3937	0,9980	0,96
	25	12217,9996	14877,1071	0,4549	0,9997	0,69
	30	9326,5215	13474,6713	0,4033	0,9949	2,58
	35	9342,0994	10680,1979	0,4081	0,9999	0,41
	40	8629,5126	11015,5454	0,3932	0,9902	1,94
	45	10572,4804	11017,9521	0,4276	0,9998	0,48
	50	8878,0463	7224,7388	0,4130	0,9996	0,69
	55	8368,1240	7836,7175	0,3884	0,9995	0,65
60	4941,1685	10396,0508	0,3402	0,9990	0,97	

Observa-se que todos os modelos ajustados apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,96 e desvios percentuais médios (P) menores que 4%,

podendo-se usar qualquer um deles na estimativa do comportamento reológico da polpa de mandacaru com 56 °Brix. Entretanto dentre os modelos testados o que pode estimar os dados com maior precisão é o de Herschel-Bulkley em razão de ter apresentado os maiores R^2 e menores P ($R^2 > 0,99$ e $P < 3\%$). BEZERRA et al. (2009) constataram ao realizar, experimentos com a polpa do morango integral (8,35 °Brix) nas temperaturas entre 10 e 60 °C, que o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de Herschel-Bulkley.

Para o modelo Lei da Potência observa-se que os valores de k - índice de consistência - diminuem com o aumento da temperatura apresentando oscilações de subida nos pontos de 20; 45 e 55 °C. Com relação ao parâmetro n , índice de comportamento do fluido, verifica-se diminuição deste parâmetro nas temperaturas entre 5 e 60 °C porém ligeiros acréscimos são registrados nas temperaturas de 15; 25 e 60°C. Constata-se, ainda, que todos os valores $n < 1$, classificando o fluido também como não-newtoniano com características pseudoplásticas. FERREIRA et al. (2008) ao analisarem o efeito da temperatura (10 a 60 °C) sobre o comportamento reológico da polpa do cupuaçu integral, observaram que o índice de consistência e o índice de comportamento do fluido diminuíram com o aumento da temperatura e também foram classificados como pseudoplásticos.

Para o modelo de Casson nota-se tendência de diminuição no valor do parâmetro K_{0C} - tensão inicial de Casson - com o aquecimento, com ligeira alteração de subida nas temperaturas de 10 e 55 °C. De forma semelhante, o coeficiente de viscosidade plástica, K_C , é afetado pelo aumento de temperatura, sofrendo redução nos seus valores somente nas temperaturas 20; 45 e 60 °C apresenta ligeiras variações de aumento. VANDRESEN et al. (2009), analisaram o efeito da temperatura sobre o comportamento reológico de suco de cenoura (7,57 °Brix), em diferentes temperaturas 8 a 85 °C, e constataram, através do modelo de Casson, que a tensão inicial e o índice de consistência $-K_C$, diminuíram com o aumento da temperatura.

Para o modelo de Herschel-Bulkley observa-se tendência de diminuição no valor do parâmetro τ_{0H} (tensão de cisalhamento inicial) entre as temperaturas de 5 e 60 °C, porém, com ligeiro aumento em relação aos outros valores nas temperaturas de 20 e 45 °C. A redução da tensão inicial com o aumento da temperatura indica que se precisa de uma tensão menor para iniciar o escoamento nas temperaturas mais altas. Observa-se para o valor de K_H - índice de consistência do modelo de Herschel-Bulkley, tendência de diminuição dos valores com o aquecimento, apresentando porém aumento nas

temperaturas de 20; 40; 45 e 60 °C. Em relação ao coeficiente n_H – índice de comportamento do fluido de Herschel-Bulkley - apresentou diminuição de valor entre as temperaturas de 5 a 60 °C. Os valores de n_H foram menores que 1, significando mais uma vez, que se trata de um fluido pseudoplástico. RIGO et al. (2010) também verificaram para a polpa de butiá, com teor de sólidos solúveis totais de 9,5 °Brix, comportamento pseudoplástico, redução de τ_{0H} com o aumento da temperatura entre 10 e 60 °C e melhor ajuste através do modelo de Herschel-Bulkley. HAMINIUK (2005) ao avaliar o comportamento reológico da polpa de amora-preta integral, nas temperaturas entre 10 a 60 °C, constatou que o parâmetro do modelo Herschel-Bulkley τ_{0H} aumentou com a temperatura e o índice de consistência diminuiu com o aquecimento.

Nas Figuras B.3 e B.6 (Apêndice B) tem-se os reogramas da polpa de mandacaru com 56 °Brix com ajustes pelos modelos Lei da Potência e Casson. Na Figura 4.3 estão representadas as curvas de ajuste para o modelo de Herschel-Bulkley das curvas de escoamento (tensão de cisalhamento versus taxa de deformação), obtidas nas doze diferentes temperaturas para a polpa do fruto do mandacaru a 56°Brix. Constata-se que as curvas de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação, não são lineares, caracterizando o fluido como não newtoniano e pseudoplástico; comportamento semelhante foi verificado por MORAES et al. (2011) para a polpa da manga, a 30°C e 31,5°Brix.

Pode-se observar, pela posição relativa das curvas, ocorrer redução na tensão de cisalhamento com o aumento da temperatura sendo que as curvas se aproximam bem no decorrer do aquecimento, sobretudo nas temperaturas de maior valor. Os valores de tensão de cisalhamento para uma taxa de deformação fixa, decrescem em todas as amostras com o aumento da temperatura, significando que a viscosidade aparente diminui com o aumento da temperatura. PONTES et al. (2004) também observaram que a viscosidade aparente diminuiu com o aumento da temperatura e aumentou com a concentração.

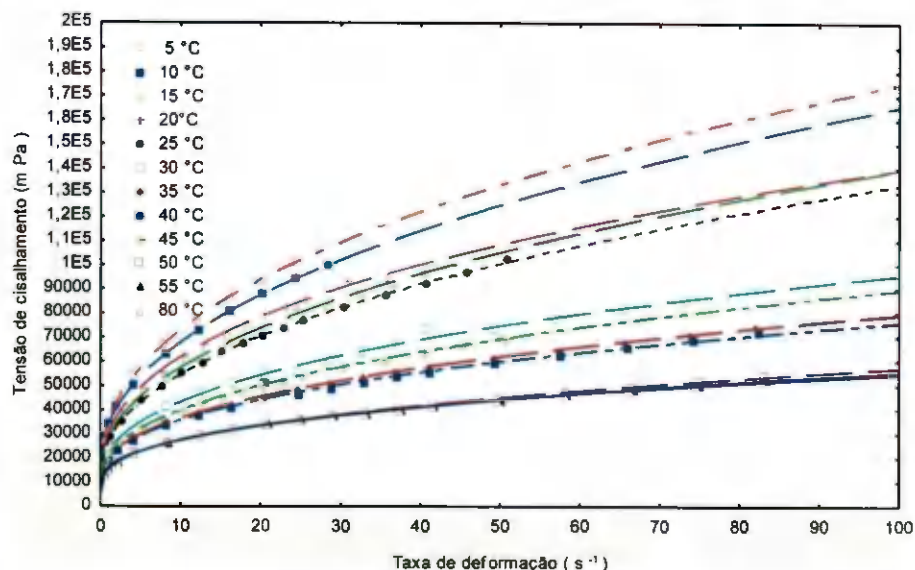


Figura 4.3 - Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do mandacaru, na concentração de 56 °Brix, com ajuste pelo modelo de Herchel Bulchey

Nas Figuras 4.1; 4.2 e 4.3, vê-se o comportamento reológico da polpa do mandacaru com concentração de 12; 35 e 56 °Brix, e estão grafados os valores de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação ajustados pelo modelo Herchel Bulchey, considerado o melhor modelo. Observa-se que a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação não é constante confirmando que, nessas concentrações trata-se de um fluido não newtoniano. VIDAL & GASPARETTO (2000), observaram, ao estudar o comportamento reológico do suco integral da manga, a 30 °C, o melhor ajuste com o modelo Herehel Bulchey ($R^2 = 0,999$).

4.2.2 – Viscosidades aparentes

Na Tabela 4.5 se apresentam os dados da viscosidade aparente da polpa do mandacaru integral (12 °Brix) em diferentes temperaturas.

Notam-se aumentos estatisticamente significativos dos valores de viscosidade com o aumento da velocidade de rotação, para todas as temperaturas, configurando comportamento dilatante. Com o aumento da temperatura ocorreram diminuições estatisticamente significativas. Comportamento semelhante foi verificado por HERNANDEZ et al. (1995) para o suco de laranja ultrafiltrado; os autores constataram,

então, diminuição significativa da viscosidade aparente com a diminuição da concentração e aumento da temperatura.

Tabela 4.5 - Viscosidade aparente (Pa.s) da polpa de mandacaru integral (12 °Brix) em função da velocidade de rotação e temperatura

Velocidade de rotação (rpm)	Temperatura (°C)		
	10	30	50
80	23,80 gA	17,23 gB	14,37 fC
90	24,73 gA	17,47 gB	15,57 eC
100	25,87 fA	19,03 fB	16,37 eC
120	28,00 eA	20,80 eB	17,60 dC
140	30,07 dA	22,60 dB	19,20 cC
160	31,97 cA	24,13 cB	20,67 bC
180	33,67 bA	25,77 bB	21,83 aC
200	35,40 aA	27,20 aB	22,80 aC

DMS para colunas = 1,11; DMS para linhas = 0,84; MG = 23,17; CV% = 1,85

DMS - Desvio mínimo significativo; MG - Média geral; CV - Coeficiente de variação

Obs: As médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade

Constata-se aumentos estatisticamente significativos dos valores de viscosidade com o aumento da velocidade de rotação, para todas as temperaturas, configurando comportamento dilatante. Com o aumento da temperatura ocorreram diminuições estatisticamente significativas. Comportamento semelhante foi verificado por HERNANDEZ et al. (1995) para o suco de laranja ultrafiltrado, ao constatarem diminuição significativa da viscosidade aparente com a diminuição da concentração e o aumento da temperatura.

Na Figura 4.4 tem-se a apresentação gráfica das curvas de ajuste linear da viscosidade aparente, em função da velocidade de rotação, da polpa do mandacaru com 12 °Brix (integral). Observa-se que com os $R^2 > 0,99$ poder-se-á usar referidas equações para estimar a viscosidade aparente. Nota-se, ainda, que a viscosidade aparente não apenas diminui com o aumento da temperatura mas aumenta com o aumento da velocidade de rotação apresentando, nesta concentração, características dilatantes. ZURITZ et al. (2005) verificaram que a viscosidade aparente do suco da uva clarificado nas temperaturas de 20 a

80 °C e concentrações de 22,9 a 70,6 °Brix, que a viscosidade diminuiu com o aumento da temperatura e aumentou com o aumento da concentração.

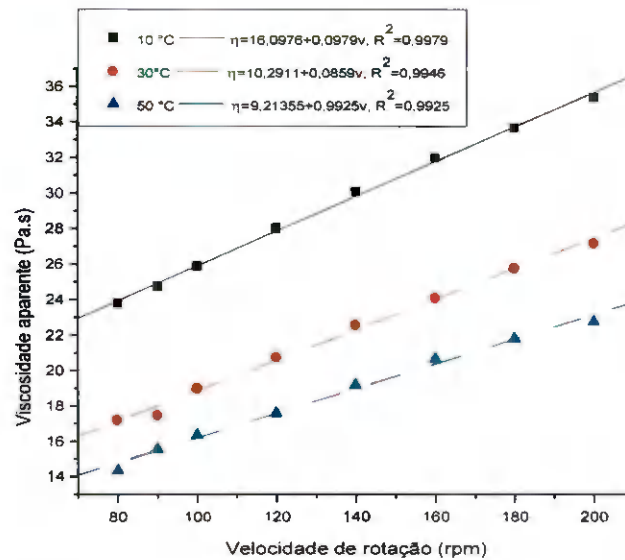


Figura 4.4 - Viscosidade aparente da polpa de mandacaru integral (12 °Brix) em função da velocidade de rotação nas diferentes temperaturas

Na Tabela 4.6 se apresentam os dados da viscosidade aparente da polpa do mandacaru, na concentração de 35 °Brix. Nota-se que houve diminuições estatisticamente significativas dos valores com o aumento da velocidade de rotação e com o aumento da temperatura apresentando, nesta concentração características pseudoplásticas. AHMED et al. (2005), afirmam que vários estudos mostraram que a polpa de manga também se comporta como fluido pseudoplástico, como resultado de uma interação complexa entre os açúcares solúveis, substâncias pépticas e sólidos em suspensão.

Tabela 4.6 - Viscosidade aparente (Pa s) da polpa de mandacaru com 35 °Brix, em função da velocidade de rotação e temperatura

Velocidade de rotação (rpm)	Temperatura (°C)		
	10	30	50
80	624,23 aA	427,10 aB	316,23 aC
90	609,90 aA	402,97 bB	298,13 bC
100	580,00 bA	380,00 cB	277,33 cC
120	526,33 cA	335,53 dB	243,33 dC
140	476,50 dA	301,93 eB	218,80 eC
160	437,70 eA	277,70 fB	201,07 efC
180	409,23 fA	260,00 fgB	187,93 fgC
200	387,00 gA	246,00 gB	178,50 gC

DMS para colunas = 18,03; DMS para linhas = 13,76; MG = 358,48; CV% = 1,94

DMS - Desvio mínimo significativo; MG - Média geral; CV - Coeficiente de variação

Obs: As médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade

Na Figura 4.5 tem-se a representação gráfica das curvas de ajustes lineares da viscosidade aparente em função da velocidade de rotação, da polpa do fruto do mandacaru na concentração integral de 35 °Brix. Nota-se que se pode usar essas equações na estimativa da viscosidade, em razão de ter apresentado $R^2 > 0,9$. Constata-se que a viscosidade aparente diminuiu com a temperatura e com a velocidade de rotação caracterizando, portanto, tratar-se de um fluido de comportamento pseudopiástico, nesta concentração. DINIZ (2009), trabalhando com polpa da manga Ubá em diferentes temperaturas (273,15 K a 353,15 K) e concentrações de 10 ; 15 ; 20 ; 25 e 30 °Brix, constatou que a viscosidade aparente diminuiu com o aquecimento e aumentou com a concentração.

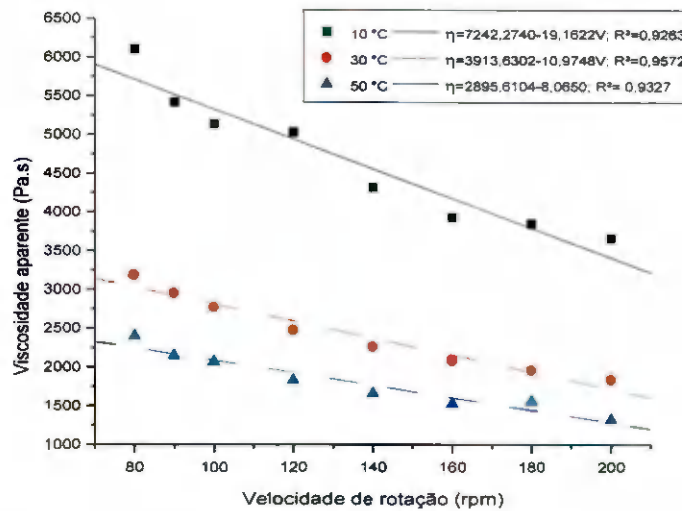


Figura 4.5 - Viscosidade aparente da polpa de mandacaru com 35 °Brix em função da velocidade de rotação nas diferentes temperaturas

Na Tabela 4.7 apresentam-se os dados da viscosidade aparente da polpa do fruto do mandacaru, na concentração de 56°Brix.

Tabela 4.7 - Viscosidade aparente (Pa s) da polpa de mandacaru com 56 °Brix em função da velocidade de rotação e temperatura

Velocidade de rotação (rpm)	Temperatura (°C)		
	10	30	50
80	6100,00 aA	3187,33 aB	2404,33 aC
90	5414,67 bA	2959,33 abB	2148,33 abC
100	5133,33 bA	2780,00 abcB	2070,00 abcC
120	5027,67 bA	2480,33 bcdB	1836,33 abcdC
140	4321,33 cA	2266,67 cdeB	1664,33 bcdC
160	3929,33 edA	2089,67 deB	1531,33 cdC
180	3848,33 edA	1957,67 deB	1554,00 cdB
200	3660,00 dA	1845,00 eB	1326,67 dC

DMS para colunas = 580,36; DMS para linhas = 443,04; MG = 2980,67; CV% = 7,528

DMS - Desvio mínimo significativo; MG - Média geral; CV - Coeficiente de variação

Obs: As médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade

Nota-se tendência de diminuição dos valores, com aumento da velocidade de rotação e da temperatura apresentando, nesta concentração, características pseudopásticas. FERREIRA (2002) verificou, ao trabalhar com polpa de caju e goiaba com temperaturas variando de 10 a 60 °C, que, com o aumento da temperatura, ocorreu diminuição das viscosidades aparentes.

Na Figura 4.6 tem-se a representação gráfica das curvas de ajuste lineares da viscosidade aparente, em função da velocidade de rotação, da polpa do fruto do mandacaru, na concentração integral de 56 °Brix. Verifica-se que as equações lineares podem ser usadas para prever a viscosidade nas diferentes temperaturas, em razão do $R^2 > 0,9$ nota -se que a viscosidade aparente diminui com o aumento da temperatura diminuindo também com o aumento da velocidade de rotação mostrando tratar-se , nesta concentração de um fluido de comportamento pseudoplástico. SILVA et al. (2008) observaram, as propriedades reológicas da polpa de caqui nas concentrações de 14 a 18 °Brix, observaram comportamento do tipo pseudoplástico, verificando que a viscosidade aparente decresceu com o aumento da temperatura e da velocidade de rotação.

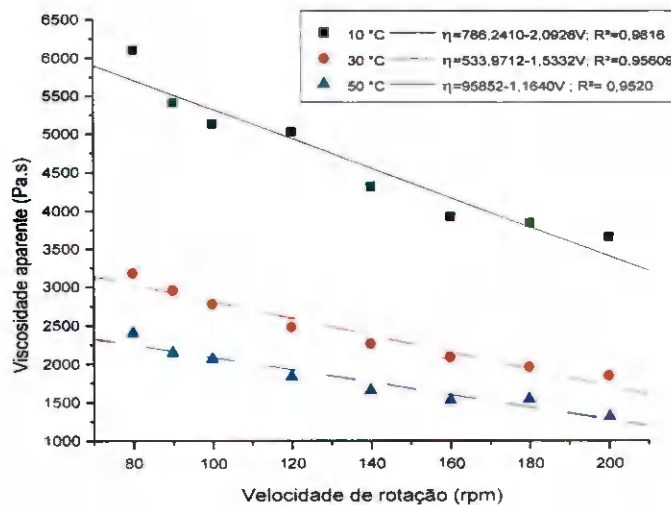


Figura 4.6 - Viscosidade aparente da polpa de mandacaru com 56 °Brix, em função da velocidade de rotação nas diferentes temperaturas

4.2.2.1 – Efeito da temperatura

Na Figura 4.7 tem-se as viscosidades aparentes da polpa do mandacaru com 12 °Brix, em função do inverso da temperatura nas diferentes velocidades de rotação. Observa-se, em todas as velocidades de rotação, que a viscosidade aparente aumentou com o inverso da temperatura. Comportamento semelhante foi verificado por TONON et al. (2009) para a polpa de açaí nas temperaturas entre 10 e 70 °C. Verifica-se, também, que para uma temperatura fixa a viscosidade aparente aumenta com o aumento da velocidade de rotação.

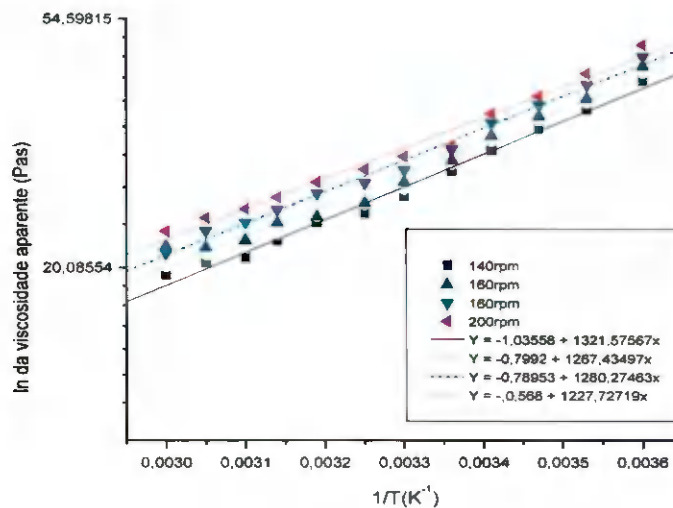


Figura 4.7 - Viscosidade aparente da polpa de mandacaru com 12 °Brix, em função do inverso da temperatura nas diferentes velocidades de rotação

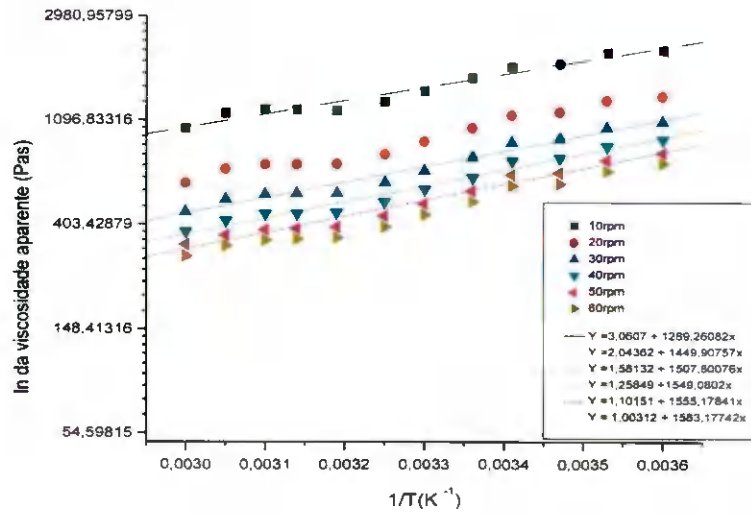
Na Tabela 4.8 tem-se os valores das constantes η_0 (viscosidade aparente inicial teórica) e das energias de ativação (E_a) calculadas para a polpa de mandacaru integral (12 °Brix) em diferentes velocidades de rotação (140 a 200 rpm) usando-se a equação de Arrhenius. Observa-se que a constante η_0 (viscosidade aparente inicial teórica) aumentou e as energias de ativação diminuíram com o aumento da velocidade de rotação. Os coeficientes de determinação (R^2) resultaram em valores superiores a 0,97, configurando bons ajustes, significando que a equação de Arrhenius pode ser utilizada para avaliar o efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente. Observa-se, ainda, que os valores da energia de ativação variaram entre 10,2405 e 11,1945 $\text{kJ g}^{-1} \text{mol}^{-1}$, sendo inferiores ao valor determinado por GUEDES et al. (2010) para a polpa de melancia (8 °Brix) nas

temperaturas entre 10 e 60 °C de 16,351 kJ g⁻¹ mol⁻¹. Segundo OHATA & VIOTTO (2011) quanto maior for o valor de E_a maior também será a influência da temperatura sobre a amostra.

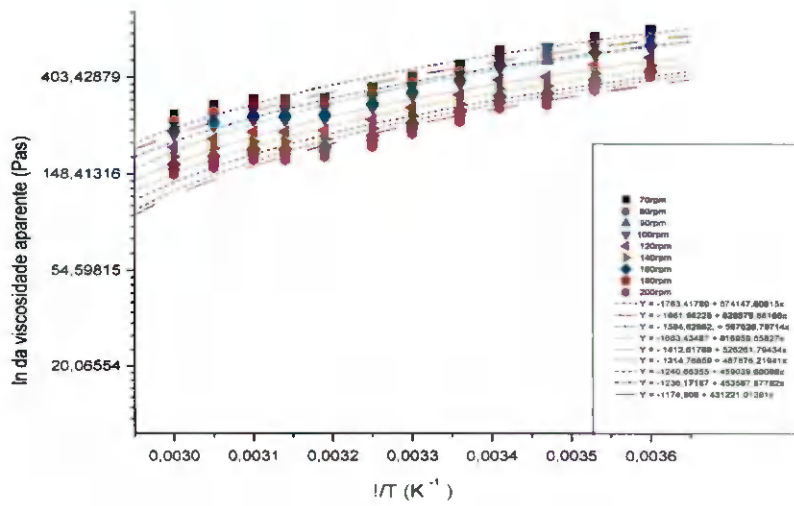
Tabela 4.8 – Viscosidades aparentes iniciais teóricas (η_0) e energias de ativação (E_a) da polpa do mandacaru integral (12 °Brix) calculadas a partir da equação de Arrhenius

Velocidade de rotação (rpm)	η_0 (Pa s)	E _a (kJ g ⁻¹ mol ⁻¹)	R ²
140	0,3550	11,0233	0,9904
160	0,3681	10,5716	0,9751
180	0,4540	10,6788	0,9912
200	0,5666	10,2405	0,9837

As viscosidades aparentes da polpa do mandacaru com 35 °Brix em função do inverso da temperatura nas diferentes velocidades de rotação se encontram na Figura 4.8a e 4.8b. Constata-se, em todas as velocidades de rotação, que a viscosidade aparente também aumentou com o inverso da temperatura. HAMINIUK et al. (2006) também verificaram comportamento semelhante para a polpa de amora preta, entre as temperaturas de 10 e 60 °C.



(a)



(b)

Figura 4.8 - Viscosidade aparente da polpa de mandacaru com 35 °Brix, em função do inverso da temperatura nas diferentes velocidades de rotação

Na Tabela 4.9 tem-se os valores das constantes η_0 (viscosidade aparente inicial teórica) e das energias de ativação (E_a) calculadas para a polpa de mandacaru com 35 °Brix em diferentes velocidades de rotação usando-se a equação de Arrhenius.

Tabela 4.9 - Viscosidades aparentes iniciais teóricas (η_0) e energias de ativação (E_a) da polpa do mandacaru com 35 °Brix calculadas a partir da equação de Arrhenius

Velocidade de rotação (rpm)	η_0 (Pa s)	E_a (kJ g ⁻¹ mol ⁻¹)	R ²
10	21,3425	10,7537	0,9629
20	7,7185	12,0937	0,9685
30	4,8614	12,5766	0,9726
40	3,5201	12,9209	0,9746
50	3,0087	12,9717	0,9744
60	2,7268	12,9551	0,9753
70	2,6249	12,8437	0,9749
80	2,4167	12,8401	0,9755
90	2,1474	13,0213	0,9774
100	1,3769	14,0223	0,9497
120	1,3702	13,6918	0,9755
140	1,1341	13,9300	0,9769
160	0,9807	14,1071	0,9787
180	0,7801	14,5476	0,9785
200	0,7539	14,5108	0,9786

Observa-se tendência de redução da constante η_0 com o aumento da velocidade de rotação. De acordo com GUEDES et al. (2010), esta equação indica tendência geral da diminuição da viscosidade aparente com o aumento da temperatura. Para a energia de ativação ficou patente a tendência de aumento com o aumento da velocidade de rotação verificando-se, nesses valores, uma variação entre 10,9100 e 14,5476 kJ g⁻¹ mol⁻¹. Valor da energia de ativação inferior ao do presente estudo foi quantificado por SATO & CUNHA (2007) para a polpa de jabuticaba (13 °Brix), da ordem de 9,4604 kJ g⁻¹ mol⁻¹, calculada

para uma taxa de deformação de 100 s^{-1} e faixa de temperatura entre 5 e $85 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Os coeficientes de determinação (R^2) resultaram em valores superiores a 0,94, exceto na velocidade de rotação de 120 rpm, significando que a equação de Arrhenius pode ser utilizada para estimar a viscosidade, em função da temperatura e, conseqüentemente determinar a energia de ativação.

Na Tabela 4.10 tem-se a comparação dos valores das energias de ativação (E_a) calculadas através da equação de Arrhenius para a polpa de mandaearu com 12 e 35 °Brix nas mesmas velocidades de rotação. Verifica-se, em cada velocidade de rotação, que com o aumento do teor de sólidos solúveis totais houve aumento da energia de ativação.

Tabela 4.10 – Comparação entre as energias de ativação (E_a) das polpas do mandacaru com 12 e 35 °Brix calculadas a partir da equação de Arrhenius

Velocidade de rotação (rpm)	E_a ($\text{kJ g}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)	
	Polpa do mandacaru integral (12 °Brix)	Polpa do mandacaru com 35 °Brix
140	11,0233	13,9300
160	10,5716	14,1071
180	10,6788	14,5476
200	10,2405	14,5108

Tem-se na Figura 4.9, as viscosidades aparentes da polpa do mandaearu com 56 °Brix em função do inverso da temperatura nas diferentes velocidades de rotação. Observa-se, em todas as velocidades de rotação, que a viscosidade aparente também aumentou com o inverso da temperatura. RIGO et al. (2010) também verificaram, para a polpa de butiá, entre as temperaturas de 10 e $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, redução da viscosidade aparente com aumento da temperatura.

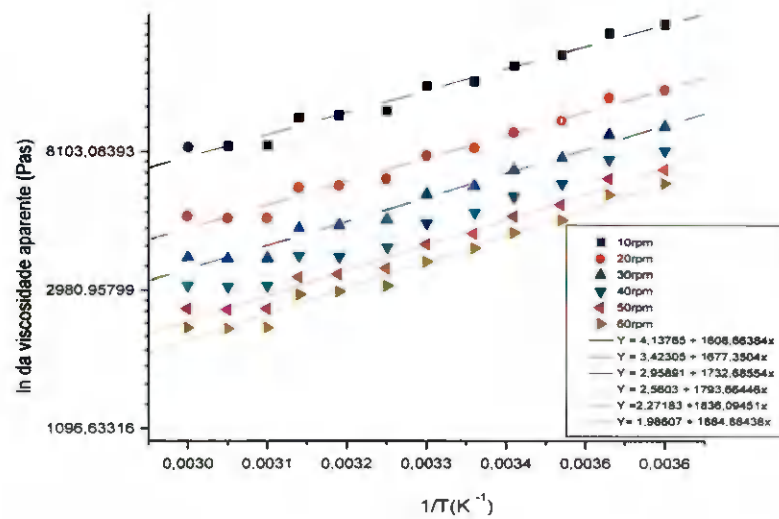


Figura 4.9 - Viscosidade aparente da polpa de mandacaru com 56 °Brix, em função do inverso da temperatura nas diferentes velocidades de rotação

Na Tabela 4.11 tem-se os valores das constantes η_0 (viscosidade aparente inicial teórica) e das energias de ativação (E_a) calculadas para a polpa de mandacaru com teor de sólidos solúveis totais de 56 °Brix em diferentes velocidades de rotação usando-se a equação de Arrhenius. Observa-se redução da constante η_0 com o aumento da velocidade de rotação e aumento da energia de ativação das amostras com o aumento da velocidade de rotação. Constata-se que os coeficientes de determinação (R^2) foram superiores a 0,97; desta forma, a equação de Arrhenius pode ser utilizada para estimar os dados de viscosidade em função da temperatura. As energias de ativação variaram entre 13,4179 e 15,7219 $\text{kJ g}^{-1} \text{mol}^{-1}$, sendo superiores aos valores determinados por GRANGEIRO et al. (2007) para a polpa de figo-da-índia com 35 °Brix, os quais se situaram entre 8,46 e 4,05 $\text{kJ g}^{-1} \text{mol}^{-1}$ determinadas em velocidades de rotação entre 10 e 100 rpm, respectivamente, para uma faixa de temperatura de 10 a 60 °C.

Tabela 4.11 - Viscosidades aparentes iniciais teóricas (η_0) e energias de ativação (E_a) da polpa do mandacaru com 56 °Brix, calculadas a partir da equação de Arrhenius

Velocidade de rotação (rpm)	η_0 (Pa s)	E_a (kJ g ⁻¹ mol ⁻¹)	R ²
10	62,6554	13,4179	0,9788
20	30,6628	13,9908	0,9754
30	19,2769	14,4523	0,9773
40	12,9397	14,9609	0,9764
50	9,74492	15,3149	0,9781
60	7,3058	15,7219	0,9787

Na Tabela 4.12 tem-se a comparação dos valores das energias de ativação (E_a) calculadas usando-se a equação de Arrhenius para a polpa de mandacaru com 35 e 56 °Brix nas mesmas velocidades de rotação.

Tabela 4.12 – Comparação entre as energias de ativação (E_a) das polpas do mandacaru com 35 e 56 °Brix calculadas a partir da equação de Arrhenius

Velocidade de rotação (rpm)	E_a (kJ g ⁻¹ mol ⁻¹)	
	Polpa do mandacaru com 35 °Brix	Polpa do mandacaru com 56 °Brix
10	10,7537	13,4179
20	12,0937	13,9908
30	12,5766	14,4523
40	12,9209	14,9609
50	12,9717	15,3149
60	12,9551	15,7219

Verifica-se, em cada velocidade de rotação, que com o aumento da concentração também ocorreu aumento da energia de ativação, significando que a temperatura exerce

maior efeito sobre a viscosidade das polpas com maior teor de sólidos solúveis totais. Comportamento inverso foi verificado por GUEDES et al. (2010) para a polpa de melancia.

4.3 – Propriedades termofísicas

4.3.1 – Massa específica

Na Tabela 4.13 apresentam-se os dados da massa específica das polpas do mandacaru integral e concentradas na temperaturas de 10 a 50 °C. Nota-se que, de forma geral, os valores da massa específica apresentaram tendência de redução com o aumento da temperatura; e com o aumento da concentração houve aumento da massa específica estatisticamente significativa, a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. LIMA et al. (2003) constataram, avaliando as propriedades termofísicas da polpa do umbu, que a massa específica da polpa desse produto também apresentou redução de valores com o aquecimento e aumento de seus valores com o aumento da concentração.

Tabela 4.13 – Massa específica (g/cm^3) da polpa de mandacaru, em função da temperatura e da concentração

Temperatura (°C)	Concentração (°Brix)		
	12	35	56
10	1,0454 aC	1,2830 aB	1,5412 aA
20	1,0411 bC	1,2211 bcB	1,4848 bA
25	1,0400 cC	1,2147 bB	1,4608 cA
30	1,0386 dC	1,2133 cB	1,4210 dA
40	1,0365 eC	1,2010 dB	1,3876 eA
50	1,0355 eC	1,1679 eB	1,3683 fA

DMS para colunas = 0,0010; DMS para linhas = 0,0008; MG = 1,2334; CV% = 0,0378

DMS - Desvio mínimo significativo; MG - Média geral; CV - Coeficiente de variação

Obs: As médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade

Verifica-se que a redução da massa específica na amostra com 12 °Brix foi de 0,95% na temperatura de 50 °C em relação à massa específica na temperatura de 10 °C; na

amostra com 35 °Brix foi de 8,79% na temperatura de 50 °C em relação à massa específica na temperatura de 10 °C e na amostra com 56 °Brix foi de 11,22% na temperatura de 50 °C em relação à massa específica na temperatura de 10 °C.

GUEDES et al. (2010) constataram, avaliando as propriedades físicas da melancia, constataram que a massa específica diminuiu com o aumento da temperatura e aumentou com o aumento da concentração; na polpa de melancia com 35 °Brix e temperatura de 10 °C esses pesquisadores encontraram um valor de massa específica de 1161,0 kg/m³ e a 20 °C de 1155,0 kg/m³, sendo inferiores ao da polpa de mandacaru nesta mesmas temperturas e concentração.

Na Tabela 4.14 se apresentam dados teóricos da massa específica da polpa do fruto do mandacaru calculados conforme as equações de Choi & Okos e Alvarado & Romero (1994). Constata-se que os erros em relação aos valores determinados experimentalmente aumentam com a concentração das amostras, podendo-se considerar bons resultados obtidos para a amostra integral (12 °Brix), e gradativamente piores até a amostra a 56 °Brix. Observa-se que os erros dos valores calculados através das diferentes equações para as amostras com 12 e 35 °Brix foram inferiores a 10% podendo-se utilizar essas equações na estimativa dos dados de massa específica da polpa do mandacaru com essas concentrações. Entretanto, deve-se evitar o uso dessas equações na estimativa dos dados da polpa com 56 °Brix (erro > 10%).

Tabela 4.14 - Valores teóricos da massa específica para a polpa de mandacaru e os erros percentuais

Equação	Massa específica (kg/m ³)		
	12 °Brix	35 °Brix	56 °Brix
Alimentos em geral (CHOI & OKOS, 1986)	1046,348	1160,90	1,264,90
Erro (%)	0,90	4,59	12,40
Sucos de frutas em geral (ALVARADO & ROMERO, 1989)	1045,0	1154,8	1251,6
Erro (%)	0,77	4,69	13,32

4.3.2 – Calor específico

Na Tabela 4.15 são apresentados os valores médios do calor específico determinado experimentalmente para a polpa do mandacaru, nas concentrações de 12, 35 e 56 °Brix. Observa-se que os valores diminuem estatisticamente à medida em que a concentração aumenta. SILVA (2008) avaliando as propriedades termofísicas da polpa do jenipapo constatou que, com o aumento da concentração (redução do teor de umidade), os valores do calor específico também diminuíram de 4,06 para 3,26 kJ/kg °C. Nota-se que, com redução do teor de umidade, há redução do calor específico com o menor valor determinado para a amostra com 36,6835% de umidade e o maior na amostra com 87,7603%. O calor específico de suco de frutas apresentado por CHOI & OKOS (1986), se situou entre 3,00 a 4,00 kJ/kg °C, estando os valores do presente trabalho próximo a esses. Outros pesquisadores reportam valores de calor específico de frutas na mesma faixa mencionada, como 3,346 kJ/kg °C para a polpa do açaí (PEREIRA et al, 2003), e 3,616 kJ/kg °C para polpa de bacuri (MUNIZ et al., 2006).

Tabela 4.15- Valores médios do calor específico da polpa do mandacaru nas diferentes concentrações

Concentração (Brix)	Teor de umidade (%)	Calor específico (kJ/kg K)
12	87,7603	3,6532 a
35	60,6489	3,3035 b
56	36,6835	2,1919 c

DMS = 0,0371; MG = 0,7290; CV% = 2,58

DMS - Desvio mínimo significativo; MG - Média geral; CV - Coeficiente de variação

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade

Na Tabela 4.16 se encontram os valores teóricos do calor específico da polpa do mandacaru, nas concentrações de 12, 35 e 56 °Brix. Observa-se que os erros em relação aos valores experimentais foram inferiores a 10% na polpa integral com as duas equações, podendo-se utilizá-los ambas na predição do calor específico desta amostra. Para a polpa com 35 °Brix a equação de Dickerson resultou em erro muito pequeno (< 2%) sendo considerada excelente para predição; contrariamente a equação de Mohsenin resultou em erro maior que 10%, devendo-se evitar seu uso. Para a polpa com 56 °Brix verificou-se o

inverso, com resultados piores para a equação de Dickerson (erro > 10%). devendo-se evitá-la e podendo usar a equação de Mohsenin na predição do calor específico.

Tabela 4.16 - Valores teóricos do calor específico para a polpa de mandacaru e os erros percentuais

Equação	Calor específico (kJ/kg K)		
	12 °Brix	35 °Brix	56 °Brix
Sucos de frutas (DICKERSON, 1968)	3,8795	3,3455	2,5964
Erro (%)	6,20	1,27	18,45
Geral (MOHSENIN, 1980)	3,8121	2,8682	2,0654
Erro (%)	4,35	13,18	5,77

4.3.3 – Difusividade térmica

Na Tabela 4.17 são apresentados os dados médios da difusividade térmica da polpa do mandacaru nas concentrações de 12, 35, e 56 °Brix.

Tabela 4.17 - Médias da difusividade térmica (m²/s) da polpa do mandacaru com diferentes concentrações

Concentração (°Brix)	Difusividade (m ² /s)
12	1,7145 x 10 ⁻⁷ a
35	1,6413 x 10 ⁻⁷ b
56	1,4370 x 10 ⁻⁷ c

DMS = 0,0721; MG = 1,5976; CV% = 1,8012

DMS - Desvio mínimo significativo; MG - Média geral; CV - Coeficiente de variação

Obs: As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade

Verifica-se que os valores da difusividade térmica diminuíram estatisticamente com o aumento da concentração. Vários pesquisadores utilizaram o método de Dickerson na determinação da difusividade como, por exemplo: VIEIRA (1996), que trabalhou com suco de laranja nas concentrações de 11, 16, 23, 27, 33, 40, 43, 54 e 65 °Brix, encontrando uma relação cúbica da difusividade térmica com a concentração; SILVA (1997) trabalhou com polpa de abacaxi nas concentrações de 15 e 25 °Brix e obteve os valores de difusividade

térmica de $1,84 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,75 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente, apresentando o mesmo comportamento em relação ao presente trabalho; SIMÕES (1997) determinou a difusividade térmica da polpa de manga integral, centrifugada, peneirada e concentrada, obtendo os seguintes valores $1,41 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $1,39 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $1,38 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,28 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente.

Na Tabela 4.18 são apresentados os valores teóricos da difusividade térmica da polpa do mandacaru nas concentrações 12, 35 e 56 °Brix e os erros em relação aos valores experimentais. Verifica-se que os erros resultantes das estimativas com a aplicação da equação de Riedel se mantiveram acima de 45%, configurando valores pouco adequados. Com a equação de Martens os resultados foram melhores mas ainda assim superiores a 18%; Diante desses erros, não se recomenda o uso dessas equações para estimativa da difusividade térmica da polpa do mandacaru nas diferentes concentrações.

Tabela 4.18 - Valores teóricos da difusividade térmica (m^2/s) para a polpa do fruto do mandacaru e os erros percentuais

Equação	Difusividade térmica (m^2/s)		
	12 °Brix	35 °Brix	56 °Brix
Alimentos em geral (Riedel, 1969)	$1,29 \times 10^{-7}$	$0,8974 \times 10^{-7}$	$0,54 \times 10^{-7}$
Erro (%)	24,75	45,32	62,42
Geral (Martens citado por SINGH, 2007)	$1,40 \times 10^{-7}$	$1,24 \times 10^{-7}$	$1,11 \times 10^{-7}$
Erro (%)	18,34	24,45	22,75

4.3.4 – Condutividade térmica

Na Tabela 4.19 se acham os dados da condutividade térmica da polpa do mandacaru nas concentrações de 12, 35, e 56 °Brix. Pode-se observar que o valor da condutividade térmica permaneceu estatisticamente igual com a mudança de concentração de 12 para 35 °Brix, reduzindo-se quando a concentração foi para 56 °Brix. Valores próximos da condutividade térmica da polpa do mandacaru foram encontrados por HAYES (1987) para o suco de mamão, que foi de $0,554 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$, e por VIEIRA (1996) para a polpa de cajá de $0,556 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$.

Tabela 4.19 - Condutividade térmica da polpa do mandacaru com diferentes concentrações

Concentrações(°Brix)	Condutividade térmica (W/m K)
12	0,6568 a
35	0,6594 a
56	0,4549 b

Na Tabela 4.20 tem-se os dados da condutividade térmica teórica da polpa do mandacaru, nas concentrações de 12, 35 e 56 °Brix. Observa-se que os erros obtidos com as equações utilizadas superaram os 22%, podendo-se considerar estimativas pouco precisas significando que se deve evitar o uso dessas equações na predição da condutividade térmica teórica da polpa do mandacaru.

Tabela 4.20 - Valores teóricos da condutividade térmica (W/mK) da polpa do mandacaru

Equação	Condutividade térmica (W/m K)		
	12 °Brix	35 °Brix	56 °Brix
Sucos de frutas (KOLAROV & GROMOV, 1973)	0,5086	0,3947	0,2940
Erro (%)	22,57	40,15	35,37
Materiais biológicos (CHOI & OKOS 1986)	36,9993	25,6155	15,5471
Erro (%)	43,68	61,16	65,75

5 - CONCLUSÕES

A polpa integral do fruto do mandacaru foi considerada alimento ácido, com baixo conteúdo mineral, alto teor de umidade e de atividade de água e com predominância da intensidade de amarelo.

A polpa integral do fruto do mandacaru apresentou comportamento dilatante nas temperaturas de 10 a 50 °C.

As polpas do fruto do mandacaru concentradas com teor de sólidos solúveis totais de 35 e 56 °Brix, apresentaram comportamento pseudoplástico.

Os modelos da Lei da Potência, Herschel-Bulkley e Casson, resultaram em bons ajustes aos dados experimentais, apresentando coeficientes de determinação superiores a 0,9.

As viscosidades das amostras aumentaram com a concentração e foram reduzidas com a temperatura.

Para a polpa integral a viscosidade aparente aumentou com o aumento da velocidade de rotação e para as polpas concentradas a viscosidade aparente diminuiu com o aumento da velocidade de rotação.

A equação do tipo Arrhenius pode ser utilizada com precisão ($R^2 > 0,9$) para avaliar o efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente das amostras.

As propriedades termofísicas das polpas integral e concentradas do fruto do mandacaru se mantiveram dentro da faixa prevista para polpa e suco de frutas.

A massa específica aumentou com o aumento do teor de sólidos solúveis totais, enquanto calor específico e a difusividade térmica diminuíram com o aumento da concentração.

Das equações utilizadas para estimar a massa específica, o calor específico, a difusividade térmica e a condutividade térmica, apenas as referentes a massa específica, e calor específico podem ser considerados razoáveis para predizer os dados das amostras em todas as concentrações, com erros abaixo de 20%.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADORNO, R. A. C. **Reologia de sucos de frutas tropicais: manga, maracujá, mamão e goiaba.** 1997. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

AHMED, J.; RAMASWAMY, H. S.; HIREMATH, N. The effect of high pressure treatment on rheological characteristics and colour of mango pulp. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 40, n. 8, p. 885–895, 2005.

ALIBERTI, N. C. M. **Influência da homogeneização a alta pressão sobre a retenção de antocianinas presentes na polpa do açaí.** 2009. 98 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ALMEIDA, M. M.; SILVA, F. L. H.; CONRADO, L. S.; FREIRE, R. M. M.; VALENÇA, A. R. Caracterização física e físico-química de frutos do mandacaru. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 2, n. 1, p. 15-20, 2009.

ALVARADO, J. D. Calor específico. In: ALVARADO, J. D.; AGUILERA, J. M. **Métodos para medir propriedades físicas em indústrias de alimentos.** Zaragoza: Acribia, 2001. p. 189-212

ALVARADO, J. D. Propriedades físicas de fruta: IV. Difusividad y conductividade térmica efectiva de pulpas. **Latin American Applied Research**, v. 24, n. 1, p. 41-47, 1994.

ALVARADO, J. D.; ROMERO, C. H. Physical properties of fruits: I -- Density and viscosity of juices as functions of soluble solids content and temperature. **Latin American Applied Research**, v. 19, n. 15, p. 15-21, 1989.

AMSTALDEN, L. C. **Estudo da deposição de hesperidina em evaporadores da indústria de citrus.** 1996. 94 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ANGELUCCI, E.; CARVALHO, L. R.; CARVALHO, N. R. P.; FIGUEIREDO, B. I.; MANTOVANI, B. M. D.; MORAES, M. R. **Análise química de alimentos: manual Técnico**. Campinas: ITAL, 1987. 123 p.

ARAÚJO, J. L. **Determinação das propriedades termofísicas da polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum schum.*)**. 2001. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Campina Grande (UFCG), Campina Grande.

ARAÚJO, J. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Propriedades termofísicas da polpa do cupuaçu com diferentes teores de sólidos. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, n. 1, p. 126-134, 2004.

ATHIÉ, I; CASTRO, M. F. P. M.; GOMES, R. A. R.; VALENTINI, S. R. T. **Conservação de grãos**. Campinas: ITAL, p. 236, 1998.

AZEREDO, H. M. C.; PINTO, G. A. S.; BRITO, E. D.; AZEREDO, R. M. C. Alterações microbiológicas durante a estocagem. In: AZEREDO, H. M. C. **Fundamentos de estabilidade de alimentos**. Fortaleza: Embrapa Agroindustrial Tropical, 2004. cap. I, p.19-35.

BAHIA, E. V. A.; MORAIS, L. R. V.; SILVA, M. P.; LIMA, O. B. V.; SANTOS, S. F. Estudo das características físico-químicas do fruto do mandacaru (*Cereus jamacaru P.DC.*) cultivado no sertão Pernambucano In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA (CONNEPI), 5., 2010. **Auais...** Maceió: IFAL, 2010. CD.

BARBOSA, H. P. **Tabela de composição de alimentos do estado da Paraíba: setor agropecuário**. 2. ed. João Pessoa: UFPB, 1998. 128 p.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. **An introduction to Rheology**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1989. 199 p.

BARUFFALDI, R.; OLIVEIRA, M. N. Fatores que condicionam a estabilidade de alimentos. In: BARUFFALDI, R.; OLIVEIRA, M. N. **Fundamentos de tecnologia de alimentos**. São Paulo: Atheneu, 1998. v. 3, cap. 2, p. 13-25.

BEZERRA, J. R. M. V. **Comportamento reológico da polpa de manga**. 2000. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos)-Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BEZERRA, J. R. M. V. **Estudo reológico do suco de manga: efeito dos sólidos insolúveis**. 1997. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BEZERRA, J. R. M.; RIGO, M.; JUNIOR, B. D.; CÓRDOVA, K. R. V. Estudo do efeito da temperatura nas propriedades reológicas da polpa de morango (*Fragaria ananassa*). **Ambiência**, v. 5, n. 1, p. 37-47, 2009.

BILLMEYER, F. W.; SALTZMANN, M. **Principles of color technology**. New York: John Wiley & Sons, 1981. 240 p.

BOURNE, M. C. Calibration of rheological techniques used for foods. **Journal of Food Engineering**, v. 16, n. 1-2, p. 151-163, 1994.

BRAGA, A. L. M. **Caracterização das interações macromoleculares em géis ácidos de caseína-xantana-sacarose: análises reológicas e térmicas**. 2002. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BRANCO, I. G.; GASPARETTO, C. A. Aplicação da metodologia de superfície de resposta para o estudo do efeito da temperatura sobre o comportamento reológico de misturas ternárias de polpa de manga e sucos de laranja e cenoura. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 23, n. supl., p. 166-171, 2003

BRASIL. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Brasília: Ministério da Saúde, 2005. 1017 p.

CABRAL, M. F. P.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Comportamento reológico da polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Schum.) peneirada. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 4, n. 1, p. 37-40, 2002.

CANUTO, T. M.; PIRES, V. C. F.; ARAÚJO, A. P.; BARBOSA, A. S. Avaliação da composição físico-química da polpa do fruto da palma. In: CONGRESSO NORTE-NORDESTE DE QUÍMICA, 1., 2007, Natal. **Anais ... Natal: UFRN, 2007. CD.**

CARBONERA L.; CARCIOFI B. M.; HUBER E.; LAURINDO J. B. Determinação experimental da difusividade térmica de uma massa de tomate comercial. **Brasilian Jouual of the Techuology**, v. 6, n. 2, p. 285-290, 2003.

CARVALHO, C. R. L.; MANTOVAN, D. M. B.; CARVALHO, P. R. N.; MORAES, R. M. **Análise química de alimentos**. Campinas: Instituto de tecnologia de alimentos, 1990. 121 p.

CASTRO, A. G.; COVAS, J. A.; DIOGO, A. C. **Reologia e suas aplicações iudustriais**. Lisboa: Instituto Piaget, 2001. 462 p.

CASTRO. F. A. F.; AZEVEDO, R. M. C.; SILVEIRA, I. L. **Estudo experimental dos alimentos**. Viçosa: UFV, 1998. 105 p.

CECCHI, H. M. **Fundamentos teóricos e práticos em análises de alimentos**. Campinas: UNICAMP, 1999. 212 p.

CHAU, K. V. **Mathematical modeling of post harvest processes**. Campinas: Grupo de Tecnologia Pós-colheita. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola, 2001.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. **Pós-colleita de frutas e hortaliças: fisiologia e manuseio**. Lavras: ESAL/FAEPE, 1990. 293 p.

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: transport phenomena. London: Elsevier Applied Science Publishers. 1986. v. 1, cap. 9, p. 93-101.

CHOI, Y. H.; YOO, B. Characterization of time-dependent flow properties of food suspensions. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 39, n. 7, p. 801-805, 2004.

CHOI, Y.; OKOS, M. R. The thermal properties of tomato juice concentrates. **Trans. ASAE**, v. 26, n. 1, p. 305-311, 1983.

CONCEIÇÃO, R. S. **Comportamento reológico da polpa de goiaba (*Psidium guajava* L.)**. 2000. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

CORRÊA, P. C.; AFONSO JUNIOR, P.C.; ANDRADE, E. T. Modelagem matemática da atividade de água em polpa cítrica peletizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n.2, p. 283-287, 2001.

DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. **Composition and properties of drilling and completion fluids.** Texas: Gulf Publishing Company, 1988. 644 p.

DAVET, A ; VIRTUOSO, S.; DIAS, J. F. G.; MIGUEL, M. D. Atividade antibacteriana de *Cereus jamacaru* DC, Cactaceae. **Revista Brasileira de Farmacologia**, v. 19, n. 2B, p. 561-564, 2009.

DIK, T.; ÖZILGEN, M. Rheological behavior of bentonite-apple juice dispersions. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v. 27, p. 55-58, 1994.

DICKERSON, R. W. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. **Food Technology**, v. 19, n. 52, p. 880-886, 1965.

DICKERSON, R. W. **Thermal properties of foods the freezing preservation of foods.** 4. ed. Westpoint: The AVI Publishing Company, 1968.

DINIZ, A. D. M. **Caracterização do comportamento reológico e determinação de propriedades termofísicas de polpa de manga Ubá**. 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

DRUMOND, M. A. **Estratégias para o uso sustentável da biodiversidade da Caatiuga**. Petrolina, 2000. 21 p.

EL BULK, R. E.; BABIKER, E. F. E.; EL TINAY, A. H. Changes in chemical composition of guava fruits during development and ripening. **Food Chemistry**, v. 59, n. 3, p. 395-399, 1997.

FERREIRA, G. M. **Reologia de polpas de caju (*Anacardium occidentale* L.) e goiaba (*Psidium guajava* L.)**. 2002. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

FERREIRA, G. M.; GUIMARÃES, M. J. O. C.; MAIA, M. C. A. Efeito da temperatura e taxa de cisalhamento nas propriedades de escoamento da polpa do cupuaçu. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 30, n. 2, p. 385-389, 2008.

FERREIRA, G. M. **Estudo das propriedades reológicas do sistema polpa de cupuaçu-biopolímeros**. 2008. 120 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FITO, P. J.; CLEMENTE, G.; SANZ, F. J. Rheological behaviour of tomato concentrate (Hot Break and Cold Break). **Journal of Food Engineering**, v. 2, n. 1, p. 51- 62, 1983.

FONTANA, A. J.; VARITH, J.; IKEDIALA, J.; REYES, J.; WACKER, B. Thermal properties of selected foods using a dual needle heat-pulse sensor. In: ASAE/CSAE-SCGR 1999 MEETING, 1999, Toronto. **Proceedings...** St Joseph: ASAE, 1999, 10 p.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das operações unitárias**. Rio de Janeiro: LTC, 1982. p. 670.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T. **Introdução a mecânica dos fluidos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, p. 16-26, 1981. 562 p.

GAFFNEY, J. J.; BAIRD, C. D.; ESHIEMAN, W. D. Analysis of the transient method for determining thermal diffusivity of fruits and vegetables. **Journal of Food Engineering**, v. 86, n. 2, p. 261-280, 1980.

GAVA, A. J. **Princípios de tecnologia de alimentos**. 2. ed. São Paulo: Ed. Nobel, 1979. 284 p.

GONÇALVES, A. L. **Propriedades termofísicas de polpa de cajá (*Spondia lutea L.*) a baixas temperaturas**. 2000. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

GONÇALVES, J. R. Introdução à reologia de alimentos fluidos. In: GONÇALVES, J. R.; CAMPOS, S. S.; MORI, E. E. M.; GASPARETTO, C. A. **Reologia e textura em alimentos**. 1. ed. Campinas: ITAL, 1989. cap. 2, p. 6-11.

GOMES, J. E.; PERECIN, D.; MARTINS, A. B. G.; FONTES, S. R. Comportamento de propriedades físicas, químicas e reológicas do suco de acerola armazenado a baixa temperatura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 296-300, 2001.

GOMES, R. G.; PENNA, A. L. B. Características reológicas e sensoriais de bebidas lácteas funcionais. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 30, n. 3, p. 629-646, 2009.

GRANGEIRO, A. A.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; MATA, M. E. R. M. C. Viscosidades de polpas concentradas de figo-da-índia. **Revista Brasileira Agroecologia**, v. 13, n. 2, p. 219-224, 2007.

GRIZOTTO, R. K. ; AGUIRRE, J. M. ; MENEZES, H. C. Frutas estruturadas de umidade intermediária obtidas de polpas concentradas de abacaxi, manga e mamão. **Ciência e Tecnologia de alimentos**, v. 25, n. 4, p. 691-697, 2005.

GUEDES, D. B.; RAMOS, A. M.; DINIZ, M. D. M. S. Efeito da temperatura e da concentração nas propriedades físicas da polpa de melancia. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 13, n. 4, p. 279-285, 2010.

GUIMARÃES, F. L. G. Avaliação das características físico-químicas e sensoriais da polpa de manga (*Mangifera indica* L.) submetida a diferentes condições de processamento e de armazenagem frigorificada. 2000. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

HAMINIUK, C. W. I. Comportamento reológico e fraçãoamento péctico das polpas integrais de araçá e amora-preta. 2005. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

HAMINIUK, C. W. I.; SIERAKOWSKI, M. R.; IZIDORO, D. R.; MASSON, M. L. Rheological characterization of blackberry pulp. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 9, n. 4, p. 291-296, 2006.

HAYES, G. D. **Food engineering data handbook**. Zaragoza: Acribia, 1987, 182 p.

HERNANDEZ, E.; CHEN, C. S.; JOHNSON, J.; CARTER, R. D. Viscosity changes in orange juice after ultrafiltration and evaporation. **Journal of Food Engineering**, v. 25, n. 3, p.387-396, 1995.

HOLDSWORTH, S. D. Applicability of rheological models to the interpretation of flow processing behaviour of fluid food products. **Journal of Texture Studies**, v. 2, n. 4, p. 393-418, 1971.

HOLDSWORTH, S. D. Rheological models used for the prediction of the flow properties of food products: a literature review. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, v. 71, n. C3, p. 139 - 179, 1993.

INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2003. 698 p.

JUSZCZAK, L.; WITCZAK, M.; FORTUNA, T.; BANYŚ, A. Rheological properties of commercial mustards. *Journal of Food Engineering*, v. 63, n. 2, p. 209-217, 2004.

KUROZAWA, L. E.; PARK, K. J.; HUBINGER, M. B.; MURR, F. E. X. Thermal conductivity and thermal diffusivity of papaya (*Carica papaya* L.) and cashew apple (*Anacardium occidentale* L.). *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 11, n. 1, p. 78-85, 2008.

LEITÃO, M. F. F. Microbiologia das frutas tropicais e seus produtos. In: MEDINA, J.C. **Alguns aspectos tecnológicos das frutas tropicais e seus produtos**. Campinas: ITAL; 1980, p. 83-126.

LEWIS, M. J. **Propriedades físicas de los limentos y de los sistemas de procesado**. Zaragoza: Acribia, 1993. 494 p.

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

LIRA, F. A. O. Propriedades reológicas de alimentos fluídos. In: ALVARADO, J. D.; AGUILERA, J. M. **Métodos para medir propiedades físicas em indústrias de alimentos**. Zaragoza: Acribia, 2001. cap. 1, p. 89-108.

LOZANO, J. E. **Fruit manufacturing: scientific basis, engineering properties, and deteriorative reactions of technological importance**. Bahia Blanca: Springer, 2006. 237 p.

MADRUGA, M. S.; ALDRIGUE, M. L. Análises químicas, físico-químicas e físicas de alimentos. In: ALDRIGUE, M. L.; MADRUGA, M. S.; FIOREZE, R.; SOARES, J. **Aspectos da ciência e tecnologia de alimentos**. João Pessoa: Editora Universitária, 2002. cap. 1, p. 11-57.

MASSA, A.; GONZALEZ, C.; MAESTRO, A. ; LABANDA, J.; IBARZ, A. Rheological characterization of peach purees. **Journal of Texture Studies**, v. 41, n. 4, p. 532-548, 2010.

MITSCHKA, P. Simple conversion of brookfield RVT: readings into viscosity functions. **Rheologica Acta**, v. 21, n. 2, p. 207-209, 1982.

MOHSENIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. New York: Gordon and Breach, 1980. 407 p.

MORAES, I. C. F.; SAMPAIO, R. M.; QUEIROZ, N. M.; SALLES, S. M.; PASCHOALETI, C. C.; PEREZ, V. H. Mango pulp (*Mangifera indica* L.) preserved by hurdle technology: physicochemical, microbiologic and rheologic characterization. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 35, n. 5, p. 610-614, 2011.

MOURA, S. C. S. R.; FRANÇA, V. L.; LEAL, A. M. C. B. Propriedades termofísicas de modelos similares a sucos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 23, n. 1, p. 62-68, 2003.

MULLER, H.G. **An introduction to food rheology**. London: Heinemann, 1973. 148 p.

MUNIZ, M. B. **Características químicas, reológicas e termofísicas de polpas de bacuri**. 2004. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

MUNIZ, M. B.; QUEIROZ A. J. M., FIGUEIRÊDO, R. M. F. Caracterização termofísicas de polpa de bacuri. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**; v. 26, n. 2, p. 360-368, 2006.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1997. v. 1, 418 p.

NEVES, F. L. C. **Resfriamento, congelamento e estocagem de alimentos**. São Paulo: IBF/ABRAVA/SINDRATAR, 1991. 176 p.

OHATA, S. M.; VIOTTO, L. A. Comportamento reológico de constituintes do ovo. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 14, n. 1, p. 10-18, 2011.

OLIVEIRA, F. M. N. ; ALEXANDRE, H. V. ; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. **Características físico-químicas da polpa e casca do fruto do mandacaru**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, 19., 2004, Recife. **Anais...** Recife: Centro de Convenções de Pernambuco, 2004. CD.

PARK, S.; HARTLEY, J. L.; WILSON, S. Quality management practices and their relationship to buyer's supplier ratings: a study in the Korean automotive industry. **Journal of Operations Management**, v. 19, n. 6, p. 695-712, 2001.

PEDROZA, J. P. **Efeito de danos mecânicos sobre propriedades físicas de grãos de milho**. 1991. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Paraíba, Campina Grande.

PELEGRINE, D. H.; SILVA, F. C.; GASPARETTO, C. A. Rheological behavior of pineapple and mango pulps. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v. 35, n. 8, p. 645-648, 2002.

PEREIRA, E. A. Propriedades termofísicas da polpa de açaí (*Euterpe Oleracea Mart.*), 2001. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2001.

PEREIRA, E. A.; QUEIROZ A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Comportamento reológico de mel da abelha urucu (*Melipona scutellaris*, L.). **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 5, n. 2, p. 179-186, 2003.

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

PIETROBON, C. L. R.; PEREIRA, N. C. E.; FREIRE, J. T. Determinação da condutividade térmica: 1 – análise experimental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

SISTEMAS PARTICULADOS, 15., 1987, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, v. 1, p. 150-161, 1987.

PONTES, L. V. **Avaliação sensorial e instrumental da cor de misturas em pó para refresco, bebida isotônica e gelatina utilizando corantes naturais.** 2004. 86 f. Dissertação (Mestrado em Nutrição Humanas) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

QUEIROZ, A. J. M. **Estudo do comportamento reológico dos sucos de abacaxi e manga.** 1998. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

QUEIROZ, A. J. M.; BEZERRA, J. R. M. V.; GASPARETTO, C. A. Influência de diferentes teores de sólidos insolúveis suspensos nas características reológicas de sucos de abacaxi naturais e despectinizados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 75-79, 2000.

QUEIROZ, F. **Estudo da cinética de extração do óleo essencial de capim-limão com dióxido de carbono líquido.** 1993. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

RAHMAN, M. S. **Food properties handbook.** Ney York: CRC Press, 1995. 500 p.

RAMOS, A. M.; IBARZ, A. Density of juice and fruit puree as a function of soluble solids content and temperature. **Journal of Food Engineering**, v. 35, n. 1, p. 57-63, 1998.

RAO, M. A., COOLEY, H. J. Application of flow models with yield for tomato concentrates. **Journal of food engineering**, n. 3, v. 6, p. 159-173, 1982.

RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods.** 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1994. 531 p.

RAPUSAS, R. S.; DRISCOLL, R. H. Thermophysical properties of and dried white onion slices. **Journal of Food Engineering**, v. 30, n. 24, p. 149-164, 1995.

- RIBEIRO, E. P.; SERAVALLI, E. A. G. **Química de alimentos**. São Paulo: Edgard Blücher/Instituto Mauá de Tecnologia, 2004. 184 p.
- RIEDEL, L. Measurements of thermal diffusivity of foodstuffs rich in water. **Kaltetechnik-Klimatisierung**, v. 21, n. 11, p. 315-316, 1969.
- RIGO, M.; BEZERRA, J. R. M. V.; CÓRDOVA, K. R. V. Estudo do efeito da temperatura nas propriedades reológicas da polpa de butiá (*Butia eriospatha*). **Ambiência**, v. 6 n. 1 p. 25-36, 2010.
- RIZZINI, C. T.; MORS, W. B. **Botânica econômica brasileira**. São Paulo: EPU- Editora Pedagógica Universitária/EDUSP- Editora da Universidade de São Paulo, 1995. 241 p.
- ROCHA, E. A.; AGRA, M. F. Flora do Pico do Jabre, Paraíba, Brasil: *Cactaceae juss.* **Acta Botânica Brasilica**, v. 16, n. 1, p. 15-21, 2002.
- SARRIA, S. D. ; HONÓRIO, S. L. Condutividade e difusividade térmica do figo (*Ficus carica* L.) “Roxo de Valinhos”. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 1, p. 185-194, 2004.
- SATO, A. C. K.; CUNHA, R. L. Influência da temperatura no comportamento reológico da polpa de jaboticaba. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 4, p. 890-896, 2007.
- SHAMSUDIN, R.; MOHAMED, I. O.; YAMAN, N. K. M. Thermophysical properties of Thaiseedless guava juice as affected by temperature and concentration. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 3, p. 395-399, 2005.
- SHARMA. S. K.; LEMAGUER. M.; LIPTAY, A.; POYSA, V. Effect of composition on the rheological properties of tomato thin pulp. **Food Research International**, v. 29, n. 2, p. 175-179, 1996.
- SHARMA, S. K.; MULVANEY, S. J.; RIZVI, S. S. H. **Food processing engineering: theory and experiments**. United States of America: Wiley-Interscience, 2000. 348 p.

SHAW, D. J. **Introdnetion to colloid and surface chemistry**. 4 ed. Butterworth-Heinemann, 1992. 320 p.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 4, n. 1, p. 71-78, 2002.

SILVA, F. C. **Reologia do suco de acerola: efeito da concentração e temperatura**. 1999. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SILVA, S. B. **Propriedades termofísicas de polpa de abacaxi**. 1997. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SILVA, L. R.; ALVES, R. E. Avaliação da composição físico-química de frutos de mandacaru (*Cereus jamacaru* P.). **Acta Agronômica**, v. 58, n. 4, p. 245-250, 2009.

SILVA, M.; MATA, M. E. R. M. C.; DUARTE, M. E. M.; PEDROZA, J. P.; NASCIMENTO, J. P. T. Resfriamento e propriedades termofísicas do cajá (*Spondias lutea* L.). **Revista de Produtos Agroindustriais**, v. 4, n. 2, p. 175-185, 2002.

SILVA, N. M. C. **Propriedades termofísicas e comportamento reológico de polpa de genipapo (*Genipa americana* L.)**. 2008. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga.

SILVA, F. C.; GUIMARÃES, D. H. P.; GASPARETO, C. A. Reologia do suco de acerola: efeitos da concentração e temperatura. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 1, p. 121, 2005.

SILVA, R. R.; BOCCHI, N.; ROCHA FILHO, R. C. **Introdução à química experimental**. São Paulo: McGraw-Hill, 1990. 296 p.



SILVA, C. S. A.; QUERIDO, A. F.; GUIMARÃES, D. H. P. **Caracterização das propriedades reológicas da polpa do caqui**. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 13., MOSTRA DE PÓS GRADUAÇÃO, 9., Taubaté. **Anais...** Taubaté: Universidade de Taubaté, 2008. EPB0079, p. 1-5.

SIMÕES, R. M. **Propriedades termofísicas da polpa de manga**. 1997. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SINGH, R. P. Heating and cooling processes for foods. In: HELDMAN, D. R.; LUND, D. B. **Handbook of food engineering**. New York: CRC Press, 2007. cap. 5, p. 397-426.

STEFFE, J. F. **Rheological methods in food process engineering**. 2. ed. Michigan: Freeman Press, 1996. 428 p.

SUGAI, A. Y. **Processamento descontínuo de purê de manga (*Mangifera indica* Linn), variedade Haden: estudo da viabilidade do produto para pronto consumo**. 2002. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Escola politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo.

SWEAT, V. E. Thermal properties of food. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1994. cap. 3, p. 99-138.

TOLEDO, R. T. **Fundamentals of food process engineering**. New York: Chapman & hall, 1991. 602 p.

TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L.; YAMASHITA, F. Thermophysical properties of brasilian orange juice as affected by temperature and water content. **Journal of Food Engineering**, v. 38, n. 1, p. 27-40, 1999.

TONELI, J. T. C. L.; MURR, F. E. X.; PARK, K. J. Estudo da reologia de polissacarídeos utilizados na indústria de alimentos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 7, n.2, p. 181-204, 2005.

TONON, R. V.; ALEXANDRE, D.; HUBINGER, M. D.; CUNHA, R. L. Steady and dynamic shear rheological properties of açai pulp (*Euterpe oleraceae* Mart.). **Journal of Food Engineering**, v. 92, n. 4, p. 425–431, 2009.

TORREZAN, R. **Cnrso de processamento de frutas**. Rio de Janeiro: EMBRAPA - CTAA, 1997. 137 p.

VANDRESEN, S.; QUADRI, M. N. M.; SOUZA, J. A. R.; HORTZ, D. Temperature effect on the rheological behavior of carrot juices. **Journal of Food Engineering**, v. 92, n. 2, p. 269–274, 2009.

VAN WAZER, J. R.; LYONS, J. W.; KIM, K. Y.; COLWELL, R. E. **Viscosity and flow measurement: a laboratory handbook of rheology**. New York: Interscience Publishers, 1963. 406 p.

VIANA, A. D. **Propriedades termofísica e comportamento reológico da polpa do fruto do cupuaçu em diferentes coucentrações (*Theobroma grandiflorum*) em diferentes couceutrações e temperaturas**. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga.

VIDAL, J. R. M. B.; GASPARETTO, C. A.; GRANDIN, A. Efeito da temperatura no comportamento reológico da polpa de manga. **Revista Ciêucias Exatas e Naturais**, v. 1, n. 2, p. 69-76, 2000.

VIEIRA, J. A. G. **Propriedades termofísicas e convecção no escoamento laminar de suco de laranja em tubos**. 1996. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

VITALI, A. A.; RAO, M. A. Flow behavior of guava puree as a function of temperature and concentration. **Journal Texture Studies**, v. 13, n. 3, p. 275-289, 1982.

ZURITZ, C. A.; MUÑOZ PUNTES, E.; MATHEY, H. H.; PÉREZ, E. H.; GASCÓN A.; RUBIO, L. A.; CARRULO, C. A.; CHERNIKOFF, R. E.; CABEZA, M. S. Density,

viscosity and coefficient of thermal expansion of clear grape juice at different soluble solid concentrations and temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 71, p. 143–149, 2005.

APÊNDICE A

Tabela A.1 - Análise da variância do pH da polpa do fruto do mandacaru nas concentrações de 12, 35 e 56 °Brix

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	0,36469	0,18234	3282,2000 **
Resíduo	6	0,00033	0,00006	
Total	8	0,36502		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$) G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste F

Tabela A.2 - Análise de variância da viscosidade aparente da polpa do fruto do mandacaru integral (12 °Brix), em função da velocidade de rotação e temperatura

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Velocidade de rotação (F1)	7	863,55	123,36	674,43**
Temperatura (F2)	2	1427,74	713,87	3902,70**
Interação (F1 x F2)	14	17,06	1,22	6,66**
Tratamentos	23	2308,34444	100,36280	548,6805**
Resíduo	48	8,78000	0,18292	
Total	71	2317,12444		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste F

Tabela A.3 - Análise de variância da viscosidade aparente da polpa do fruto do mandacaru com 35 °Brix, em função da velocidade de rotação e temperatura

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Velocidade rotação (F1)	7	316617,98667	45231,14095	931,3367**
Temperatura (F2)	2	881808,20528	440904,10264	9078,4832**
Interação (F1 x F2)	14	17970,03250	1283,57375	26,4296**
Tratamentos	23	1216396,22444	52886,79273	1088,9712**
Resíduo	48	2331,16000	48,56583	
Total	71	1218727,38444		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste F

Tabela A.4 - Análise de variância da viscosidade aparente da polpa do fruto do mandacaru com 56 °Brix, em função da velocidade de rotação e temperatura

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Velocidade rotação (F1)	7	20672974,44444	2953282,06349	58,6603**
Temperatura (F2)	2	108622040,3333	54311020,1667	1078,7652**
Interação (F1 x F2)	14	3101979,22222	221569,94444	4,4010 **
Tratamentos	23	132396994,0000	5756391,04348	114,3377 **
Resíduo	48	2416586,00000	50345,54167	
Total	71	134813580,0000		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste F

Tabela A.5 - Análise da variância da massa específica da polpa do fruto do mandacaru, com as concentrações de 12, 35 e 56 °Brix, respectivamente nas temperaturas de 5, 10, 20, 25, 30, 40 e 50 °C

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Velocidade rotação (F1)	5	0,07205	0,01441	66465,2117 **
Temperatura (F2)	2	1,97284	0,98642	4549781,21 **
Interação (F1 x F2)	10	0,03980	0,00398	18359,5425 **
Tratamentos	17	2,08469	0,12263	565616,70 **
Resíduo	54	0,00001	0,00000	
Total	71	2,08470		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste F

Tabela A.6 - Análise da variância da difusividade da polpa do fruto do mandacaru, nas concentrações de 12, 35 e 56 °Brix

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	0,12415	0,06208	74,9640**
Resíduo	6	0,00497	0,00083	
Total	8	0,12912		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste F

Tabela A.7 - Análise da variância do calor específico da polpa do fruto do mandacaru nas concentrações de 12, 35 e 56 °Brix

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	0,26266	0,13133	372,4802**
Resíduo	9	0,00317	0,00035	
Total	11	0,26584		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste F

Tabela A.8 - Análise da variância da condutividade térmica da polpa do fruto do mandacaru, nas concentrações de 12, 35 e 56 °Brix

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	0,08262	0,04131	218,9296**
Resíduo	6	0,00113	0,00019	
Total	11	0,08375		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste F

Tabela A.9 - Análise da variância da atividade de água da polpa do fruto do mandacaru, nas concentrações de 12, 35 e 56 °Brix na temperatura de 20°C

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	0,03132	0,01566	2013,7000 **
Residuo	6	0,00005	0,00001	
Total	8	0,03137		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste F

Tabela A.10 - Análise da variância da umidade da polpa do fruto do mandacaru nas concentrações de 12, 35 e 56 °Brix na temperatura de 20 °C

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	3918,19248	1959,09624	38154,0867 **
Resíduo	6	0,30808	0,05135	
Total	8	3918,50056		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste F

Tabela A.11 - Análise da variância dos sólidos totais da polpa do fruto do mandacaru, nas concentrações de 12, 35 e 56 °Brix a 20 °C

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	3916,31739	1958,15869	30701,6273 **
Resíduo	6	0,38268	0,06378	
Total	8	3916,70007		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste F

Tabela A.12 - Análise da variância da luminosidade da polpa do fruto do mandacaru, nas concentrações de 12, 35 e 56 °Brix

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	284,65810	142,32905	9971,6756 **
Resíduo	15	0,21410	0,01427	
Total	17	284,87220		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste F

Tabela A.13 - Análise da variância da intensidade de amarelo da polpa do fruto do mandacaru nas concentrações de 12, 35 e 56 °Brix

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	1358,45701	679,22851	11534,7219 **
Resíduo	15	0,88328	0,05889	
Total	17	1359,34029		

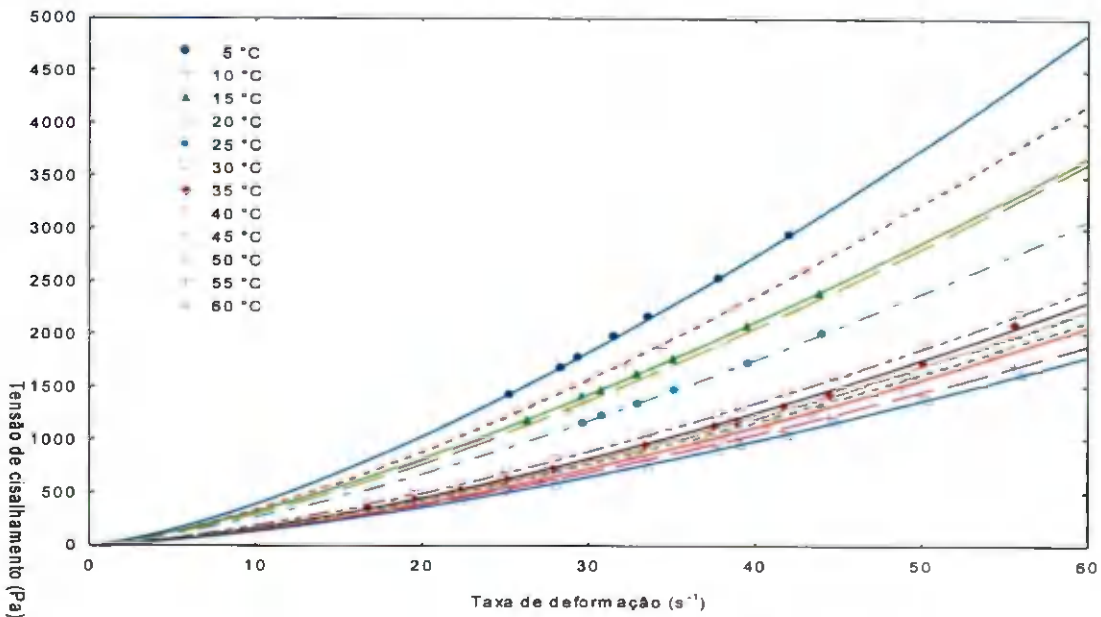
** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste F

Tabela A.14 - Análise da variância da intensidade de vermelho da polpa do fruto do mandacaru, nas concentrações de 12, 35 e 56 °Brix

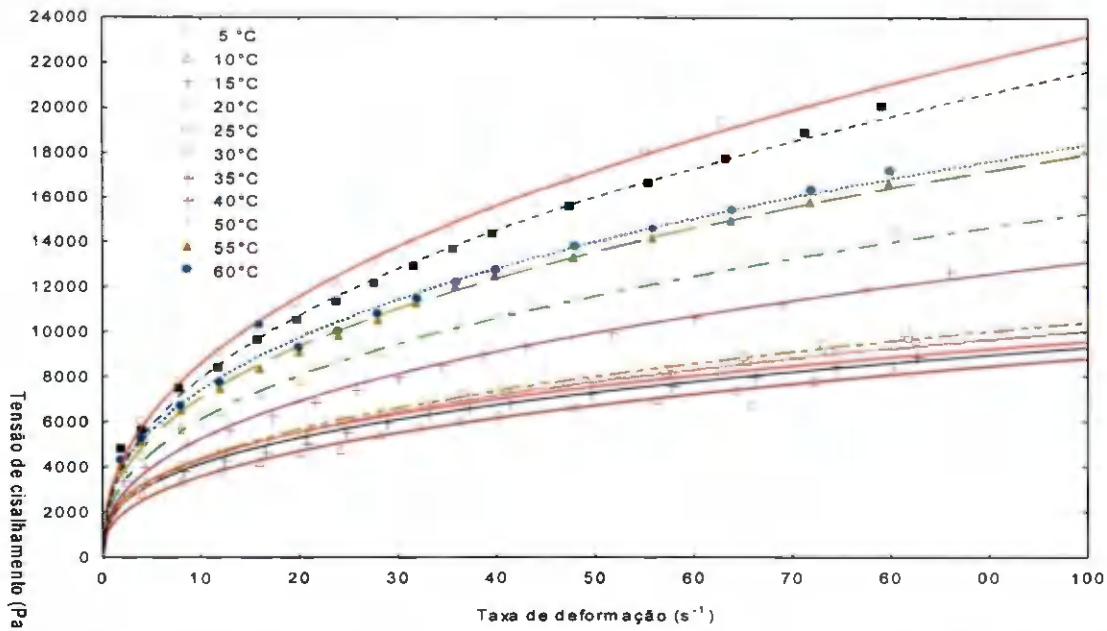
Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	4646,8798	323,43749	28239,5945 **
Resíduo	15	0,17180	0,01145	
Total	17	647,04678		

** significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste F

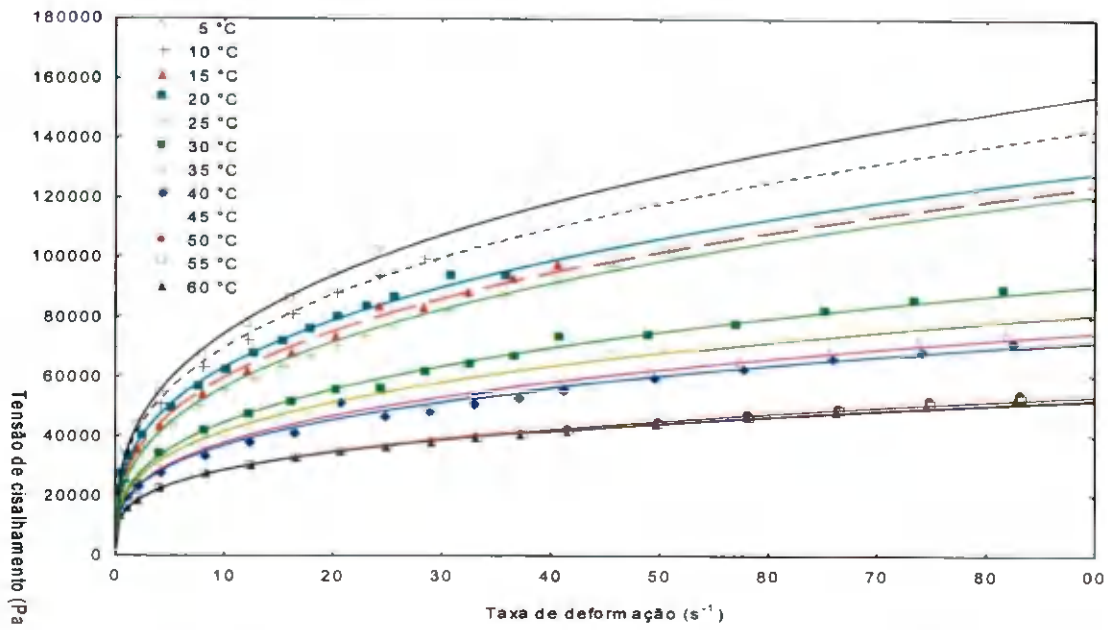
APÊNDICE B



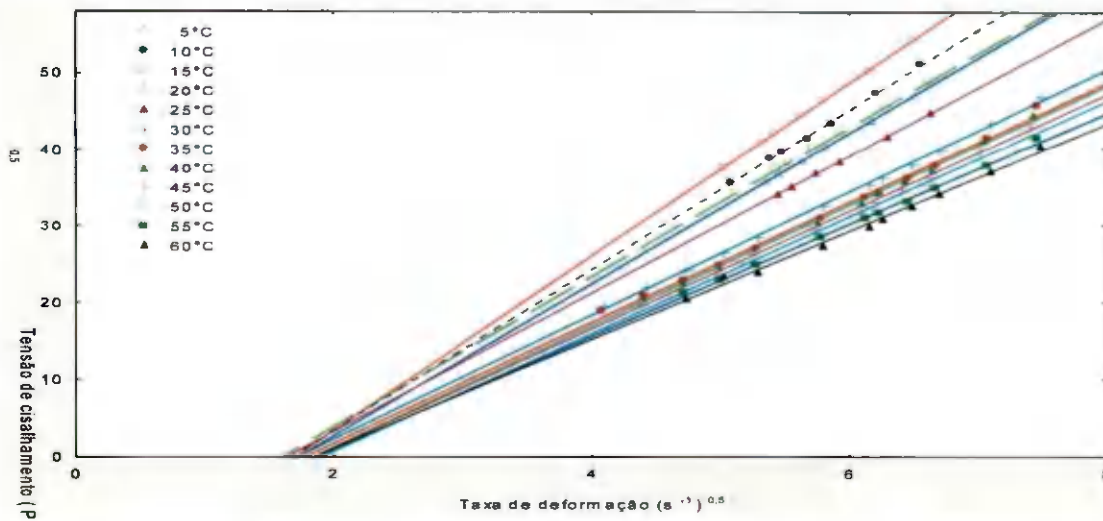
Figuras B.1 - Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do fruto do mandacaru, na concentração de 12 °Brix com ajustes pelo modelo de Ostwald-de-Waelle



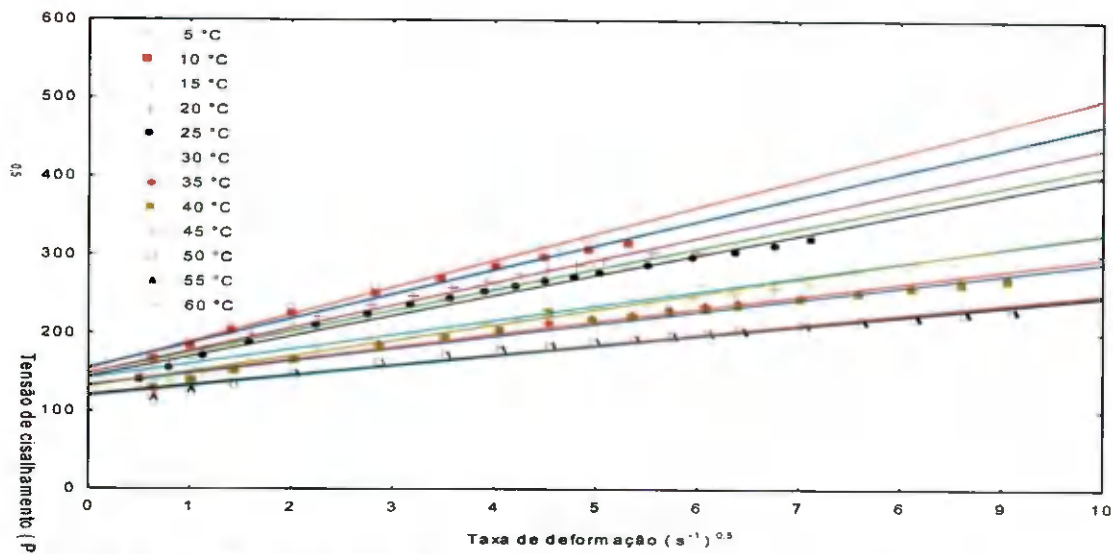
Figuras B.2 - Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do fruto do mandacaru, na concentração de 35 °Brix com ajustes pelo modelo de Ostwald-de-Waelle



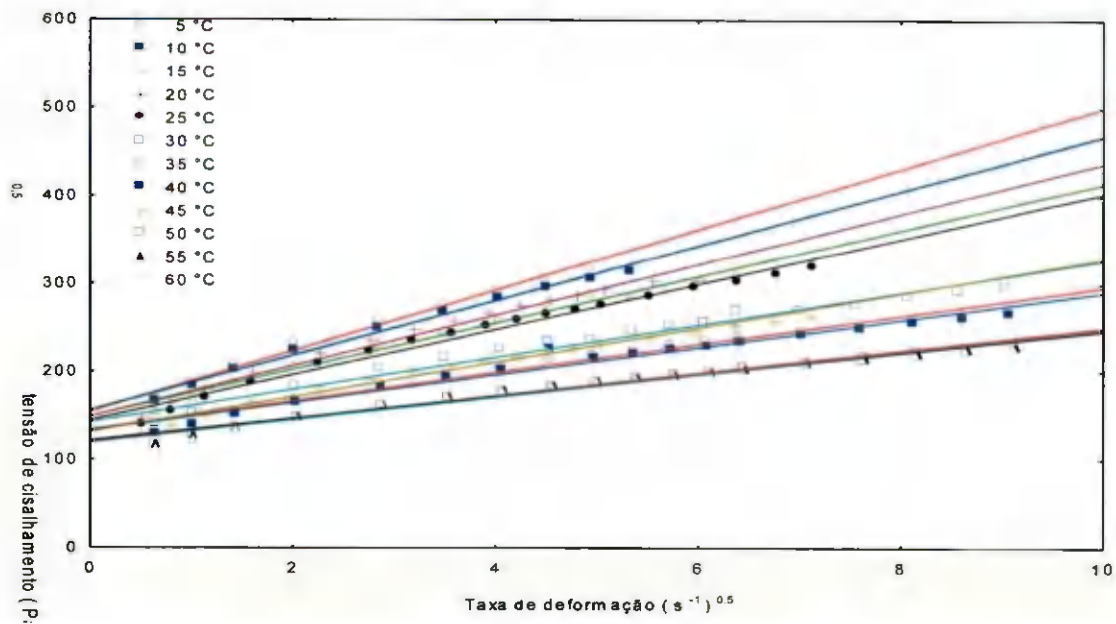
Figuras B.3 - Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do fruto do mandacaru, na concentração de 56 °Brix com ajustes pelo modelo de Ostwald-de-Waele



Figuras B.4 - Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do fruto do mandacaru, na concentração de 12 °Brix com ajustes pelo Modelo Casson



Figuras B.5 - Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do fruto do mandacaru, na concentração de 35 °Brix com ajustes pelo modelo de Casson



Figuras B.6 - Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação da polpa do fruto do mandacaru, na concentração de 56 °Brix com ajustes pelo modelo de Casson

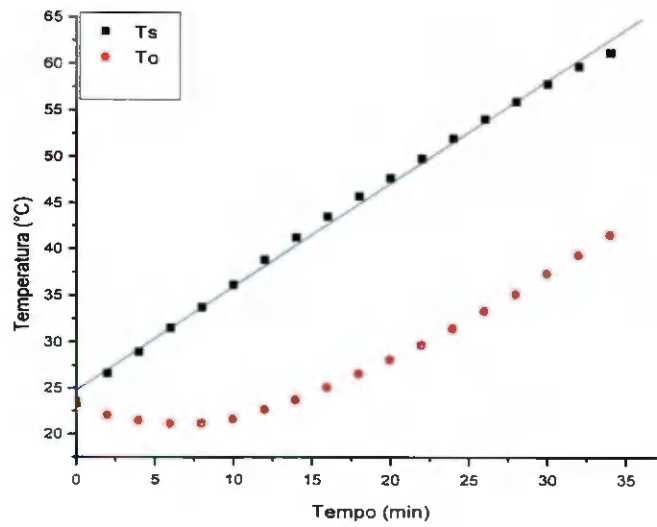


Figura B.7 – Temperatura no centro da polpa do mandacaru, com 12 °Brix e na superfície do cilindro de Dickerson, em função do tempo

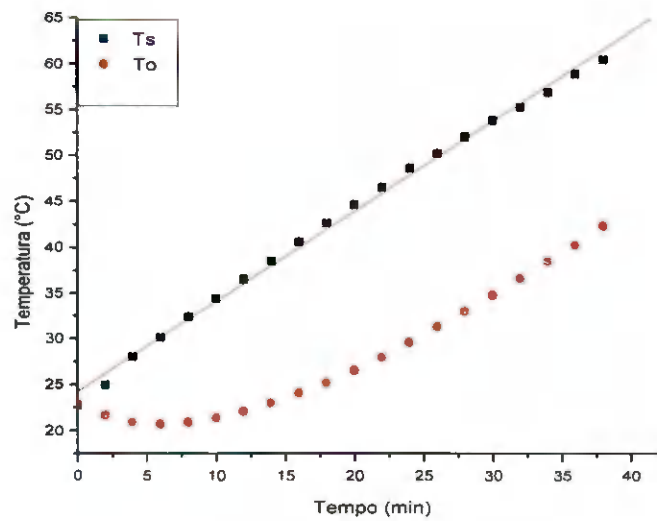


Figura B.8 - Temperatura no centro da polpa do mandacaru com 35 °Brix e na superfície do cilindro de Dickerson, em função do tempo

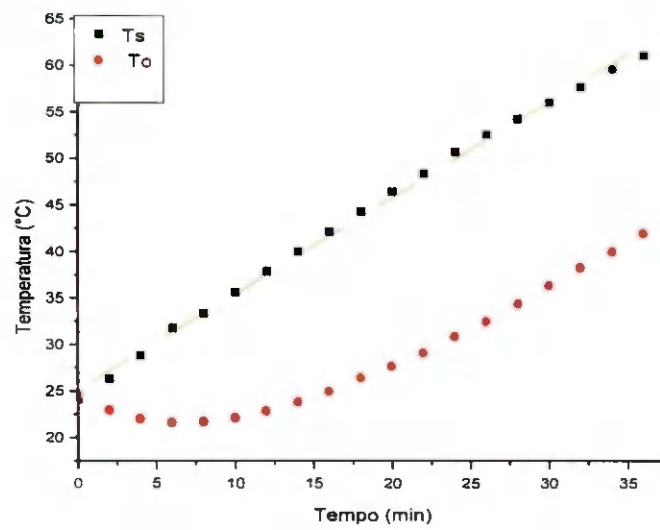


Figura B.9 - Temperatura no centro da polpa do mandacaru com 56 °Brix e na superfície do cilindro de Dickerson, em função do tempo