

MAYRA DARLIANE MARTINS SILVA DINIZ

**CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E
DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS
DE POLPA DE MANGA UBÁ**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Tecnologia de Alimentos,
para obtenção do título de *Magister
Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

MAYRA DARLIANE MARTINS SILVA DINIZ

**CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E
DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS
DE POLPA DE MANGA UBÁ**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Ciência e
Tecnologia de Alimentos para a
obtenção do título de “Magister
Scientiae”

APROVADA: 17 de julho de 2009.

Prof^a. Jane Sélia dos Reis Coimbra
(Co-orientadora)

Prof. José Antônio Marques Pereira
(Co-orientador)

Prof^a. Renata Cristina Ferreira Bonomo

Prof. Márcio Arêdes Martins

Prof. Afonso Mota Ramos
(Orientador)

"O valor das coisas não está no tempo em que elas duram, mas na intensidade com que acontecem. Por isso existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e pessoas incomparáveis"...

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

À Deus por permitir que meus sonhos se tornem realidade.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Tecnologia de Alimentos, pela oportunidade de formação acadêmica.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

Aos meus pais, Mário e Cleonisia, pelo amor, compreensão, amizade e incentivo que foram mais que fundamentais para que tudo isso se tornasse realidade. Aos meus irmãos Renata e Iko, por sempre me apoiarem nas minhas decisões e estarem sempre ao meu lado. Amo muito vocês!

Ao meu namorado Paulo, meu grande amor, por estar sempre ao meu lado, pelo carinho, companheirismo e compreensão e por acreditar nas minhas conquistas. Amo muito você.

Ao professor Afonso Mota Ramos pela orientação, amizade, confiança e ensinamentos que muito contribuíram para a minha formação.

A professora Jane pelos ensinamentos, amizade, confiança e pela disponibilização do laboratório.

Ao professor José Antônio pela ajuda, conselhos e sugestões indispensáveis para o desenvolvimento deste trabalho.

A professora Renata pela amizade e ensinamentos desde a minha graduação, e por participar da minha defesa de dissertação.

Ao professor Márcio Arêdes pela participação na banca de defesa de dissertação e pelas sugestões para esta dissertação.

À Marcinha pela amizade incondicional e por todos os dias de análise, pois com certeza sem a sua ajuda tudo seria muito mais complicado.

À equipe do meu laboratório, em especial a Aurélia, Janaína, Bruna, Danilo, Juliana, Marcos, obrigada por toda a ajuda e principalmente pela amizade de vocês.

A minha estagiária Flávia, muito obrigada pelos dias dedicados as minhas análises e amizade.

As minhas queridas amigas de pós-graduação, em especial a Manu, Carol, Brenda e Mari, pelo carinho, companheirismo, convivência e ajuda fundamental.

As minhas amigas e companheiras de república, pela amizade e compreensão.

A todos os funcionários do DTA que de alguma forma contribuíram para que essa longa jornada se encerrasse com sucesso em especial, a Geralda, Vaninha, Zé Geraldo e seu Zé.

BIOGRAFIA

MAYRA DARLIANE MARTINS SILVA DINIZ, filha de Mário Nilson Martins Diniz e Cleonisia Maria Silva Diniz, nasceu em 23 de novembro de 1981, em Janaúba, Minas Gerais.

Iniciou seus estudos na Escola Municipal Josefina Azeredo – Janaúba/MG em 1986. Em 1988, transferiu-se para a Escola Estadual Prefeito Maurício de Azevedo onde concluiu o pré-escolar e cursou até a 4ª série. Em 1993 ingressou na Escola Estadual José do Gortuba onde estudou até o 1º ano do Ensino Médio. Concluiu o Ensino médio em 1999 no Centro de Educação e Cultura – CEC Diocesano.

Em março de 2000, ingressou no curso de Engenharia de Alimentos. Em julho de 2006 graduou-se em Engenharia de Alimentos pela Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB, na cidade de Itapetinga-BA.

Em Agosto de 2007, iniciou o curso de Mestrado no programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos na Universidade Federal de Viçosa, concluindo em julho de 2009.

ÍNDICE

LISTA DE QUADROS	viii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	3
2.1. Objetivo geral	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Manga Ubá	5
3.2. Polpa de Fruta.....	6
3.3. Propriedades termofísicas	7
3.3.1. Massa específica.....	7
3.3.2. Difusividade térmica.....	9
3.4. Reologia	12
3.4.1. Classificação reológica de fluidos	15
3.4.1.1. Comportamento Newtoniano	16
3.4.1.2. Comportamento não newtoniano	16
3.4.1.2.1. Comportamento independente do tempo	17
3.4.1.2.2. Comportamento dependente do tempo	19
3.4.1.2.3. Fluidos viscoelásticos	20
3.4.2. Modelos matemáticos para fluidos inelásticos	21
3.4.3. Modelos para fluidos tixotrópicos e reopéticos	25
3.4.4. Efeito de diferentes fatores sobre a viscosidade	28
3.4.4.1. Efeito da temperatura.....	28
3.4.4.2. Efeito da concentração	29
3.4.4.3. Efeito combinado	30
3.4.5. Medidas reológicas	31
3.4.5.1. Reômetro rotacional de cilindros concêntricos	31
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
4.1. Obtenção da polpa de manga Ubá concentrada.....	33

4.2. Caracterização físico-química	33
4.3. Determinação de propriedades termofísicas	35
4.3.1. Massa específica.....	35
4.3.2. Difusividade térmica.....	35
4.4. Caracterização reológica.....	37
4.4.1. Estudo do comportamento tixotrópico	37
4.4.2. Comportamento do escoamento	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
5.1. Caracterização físico-química	39
5.2. Propriedades termofísicas	39
5.2.1. Massa específica.....	39
5.2.2. Difusividade térmica.....	43
5.3. Caracterização do comportamento reológico	45
5.3.1. Estudo do comportamento tixotrópico	45
5.3.2. Comportamento reológico do escoamento	51
5.3.2.1. Efeito da temperatura.....	57
5.3.2.2. Efeito da concentração	59
5.3.2.3. Efeito combinado da temperatura e da concentração	60
6. CONCLUSÃO	62
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Limites mínimos e máximos das características físicas e químicas para a polpa de manga.	7
Quadro 2- Equações para o cálculo da difusividade térmica..	12

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características físico-químicas e coordenadas da coloração da polpa de manga Ubá	39
Tabela 2 - Valores experimentais de massa específica de polpa de Manga Ubá em função da temperatura e concentração de sólidos solúveis...	40
Tabela 3 - Dados experimentais da difusividade térmica da polpa de manga Ubá a diferentes concentrações e temperaturas	43
Tabela 4 - Valores médios para os parâmetros A e B para a polpa de manga Ubá a temperatura de 10 °C para as concentrações estudadas...	47
Tabela 5 - Valores médios para os parâmetros τ_{0i} , τ_e , $(\tau_{0i} - \tau_e)$ e K_i para a polpa de manga Ubá a temperatura de 10 °C para as distintas concentrações estudadas	48
Tabela 6 - Valores médios para os parâmetros segundo modelo de Figoni e Shoemaker para a polpa de manga Ubá nas concentrações de (25 e 30) °Brix.	50
Tabela 7 - Valores dos parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley ($\tau = \tau_0 + K_H \dot{\gamma}^{n_H}$) para a polpa de manga Ubá a diferentes temperaturas e concentrações.....	56
Tabela 8 - Valores dos parâmetros do modelo de Arrhenius que relaciona o efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente para a polpa de Manga Ubá.....	58
Tabela 9 - Parâmetros estimados para o modelo potencial aplicados aos dados de viscosidade aparente de polpa de manga Ubá em função da concentração.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas de escoamento típicas para fluidos independentes do Tempo	18
Figura 2 - Comportamento reológico de fluidos dependentes do tempo.....	20
Figura 3 - Classificação de fluidos segundo o comportamento do escoamento dos fluidos alimentícios.....	21
Figura 4 - Diagrama esquemático do reômetro de cilindro concêntrico tipo Searle.....	32
Figura 5 - Evaporador rotativo à vácuo vertical.....	33
Figura 6 - Esquema do aparato utilizado para determinação da difusividade térmica.....	36
Figura 7 - Reômetro rotativo da marca HAAKE, modelo Modular Advanced Rheo System	38
Figura 8 - Massa específica de polpa de manga Ubá em diferentes concentrações de sólidos solúveis em função da faixa de temperatura estudada.....	41
Figura 9 - Valores experimentais de massa específica de polpa de Manga Ubá a 15 °Brix em função da temperatura (°C) e modelos teóricos encontrados na literatura.. ..	42
Figura 10 - Relação entre a massa específica experimental e a massa específica predita equação 35 para a polpa de manga Ubá a diferentes concentrações e temperaturas.....	43
Figura 11 - Relação entre a difusividade experimental e a difusividade predita segundo a equação 36 para a polpa de manga Ubá a diferentes concentrações e temperaturas.	45
Figura 12 - Relação entre tensão de cisalhamento e tempo à taxa de deformação constante de 30 s^{-1} com ajuste pelo modelo de Weltman para diferentes concentrações de polpa de manga Ubá a temperatura de $10 \text{ }^\circ\text{C}$	46
Figura 13 - Relação entre tensão de cisalhamento e tempo à taxa de deformação constante de 30 s^{-1} com ajuste pelo modelo de Figoni & Shoemaker para diferentes concentrações de polpa de manga Ubá a temperatura de $10 \text{ }^\circ\text{C}$	46

Figura 14 - Relação entre tensão de cisalhamento e tempo à taxa de deformação constante de 30 s^{-1} com ajuste pelo modelo de Figoni & Shoemaker para diferentes temperaturas de polpa de manga Ubá com concentração de $25 \text{ }^\circ\text{Brix}$	49
Figura 15 - Relação entre tensão de cisalhamento e tempo à taxa de deformação constante de 30 s^{-1} com ajuste pelo modelo de Figoni e Shoemaker para diferentes temperaturas de polpa de manga Ubá com concentração de $30 \text{ }^\circ\text{Brix}$	49
Figura 16 - Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de manga Ubá a $10 \text{ }^\circ\text{Brix}$ em diferentes temperaturas.	52
Figura 17 - Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de manga Ubá a $15 \text{ }^\circ\text{Brix}$ em diferentes temperaturas.	53
Figura 18 - Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de manga Ubá a $20 \text{ }^\circ\text{Brix}$ em diferentes temperaturas.	53
Figura 19 - Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de manga Ubá a $25 \text{ }^\circ\text{Brix}$ em diferentes temperaturas.	54
Figura 20 - Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de manga Ubá a $30 \text{ }^\circ\text{Brix}$ em diferentes temperaturas	54
Figura 21 - Efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente da polpa de manga Ubá a diferentes concentrações de sólidos solúveis.....	59

RESUMO

DINIZ, Mayra Darliane Martins Silva, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2009. **Caracterização do comportamento reológico e determinação das propriedades termofísicas da polpa de manga Ubá.** Orientador: Afonso Mota Ramos. Co-orientadores: Jane Sélia dos Reis Coimbra e José Antônio Marques Pereira.

As frutas, em geral, são perecíveis, o que lhes dá uma vida útil muito curta no mercado da fruta *in natura*. Desse modo se impõe a necessidade da industrialização dessas matérias primas para a produção de derivados. O potencial por um crescimento forte e contínuo do mercado dos sucos derivados da fruta aparece no futuro como um fato seguro. A obtenção das propriedades físicas dos alimentos é de fundamental importância para as análises dos problemas encontrados nas operações básicas das indústrias de alimentos. Existe uma crescente necessidade e procura das propriedades reológicas e termofísicas para os diversos fluidos manipulados nas indústrias de alimentos. Objetivou-se neste trabalho estudar as características físico-químicas, massa específica, difusividade térmica e propriedades reológicas da polpa de manga Ubá em diferentes temperaturas (10, 25, 40, 55, 70) °C e diferentes concentrações (5, 10, 15, 25, 30) °Brix. A polpa de manga Ubá adquirida apresentou as seguintes características físico-químicas: pH: $4,05 \pm 0,11$; acidez titulável: 0,37 % ácido cítrico; concentração de sólidos solúveis ($16,0 \pm 0,29$) °Brix; umidade: 82,17 %; açúcares totais: 10,59 (% glicose). Os dados experimentais para a massa específica e para a difusividade térmica ficaram próximos aos das faixas relatadas na literatura. Os modelos propostos forneceram ajustes, com erros percentuais entre 0,03% e 35%. A polpa de manga Ubá apresentou comportamento tixotrópico somente nas concentrações de (25 e 30) °Brix para a faixa de temperatura estudada. O modelo proposto por Fighi & Shoemaker foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais. Para a caracterização tixotrópica, os parâmetros $\tau_0 - \tau_e$ (quantidade de estrutura degradada durante o cisalhamento) e K_i (velocidade de degradação estrutural) foram obtidos. O modelo de Herschel-Bulkley descreveu satisfatoriamente o comportamento reológico da polpa de manga Ubá. Foram determinados os valores de tensão inicial (τ_0), índice de consistência (K_H),

índice de comportamento do escoamento (n_H) e viscosidade aparente (η_a) a taxa de deformação 100 s^{-1} . Os valores dos parâmetros de $\tau_0 - \tau_e$, τ_0 e η_a aumentaram com a elevação da concentração de sólidos solúveis da polpa. Os parâmetros obtidos para o estudo da tixotropia e do comportamento do escoamento da polpa de manga Ubá foram significativos ($p < 0,0001$). Adicionalmente foi estudado o efeito da temperatura, da concentração e o efeito combinado de temperatura e da concentração sobre o comportamento reológico da polpa de manga Ubá. Observou-se que a tensão de cisalhamento diminuiu com o aumento da temperatura e que houve uma tendência de diminuição da viscosidade aparente com o aumento da temperatura e um aumento da viscosidade aparente nas amostras com teores de sólidos solúveis mais elevados.

ABSTRACT

DINIZ, Mayra Darliane Martins Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2009. **Characterization of the rheological behavior and determination of thermophysical properties of mango UBA pulp.** Advisor: Afonso Mota Ramos. Co-Advisors: Jane Sélia dos Reis Coimbra and José Antônio Marques Pereira.

The fruits, in general, are perishable, which gives them a short self-life in the market for fruit *in natura*. This will require the need for industrialization of these foods for production of derivatives. The potential for strong growth and continued market of the derived juices of the fruit appears in the future as a fact safe. The acquisition of physical properties of foods is of fundamental importance for the analysis of problems found in the basic operations of the industries of foods. There is a growing need and demand of the rheological parameters and thermophysical properties for different fluids handled in the industries of foods. This study aimed to investigate the physicochemical characteristics, density, thermal diffusivity and rheological properties of Ubá mango pulp at different temperatures (10, 25, 40, 55, 70) ° C and different concentrations (5, 10, 15, 25, 30) ° Brix. The acquired mango pulp presented the following physicochemical characteristics: pH: 4.05 ± 0.11 , acidity: 0.37% citric acid, (16.0 ± 0.29) ° Brix, moisture: 82,17%, total sugar: 10.59 (% glucose). The experimental data for the density and the thermal diffusivity were close to those reported in the literature. The models proposed provided settings, with percentage errors between 0.03% and 35%. The Ubá mango pulp showed thixotropic behavior only in concentrations (25 and 30) ° Brix for range of temperature studied. The model proposed by Figoni & Shoemaker was the best fit to the experimental data. The parameters $\tau_e - \tau_o$ (number of structures damaged during shear) and K_i (structural degradation rate) were obtained to thixotropic characterization. The Herschel-Bulkley model adequately describes the rheological behavior of Ubá mango pulp. The values of yield stress (τ_o), consistency coefficient (K_H), flow behavior index (n_H) and apparent viscosity (η) at shear rate of 100 s^{-1} were determined. The values of the parameters ($\tau_o - \tau_e$), τ_o and η_a increased with the concentration of soluble solids of the pulp. The parameters obtained for the study of the thixotropic and flow behavior of the

Ubá mango pulp were significant ($p < 0.0001$). Also was studied the effect of temperature, concentration and the combined effect of temperature and concentration on rheological behavior of Ubá mango pulp. It was observed that the shear stress decreased with increasing temperature and there was a trend of apparent viscosity decrease with increasing temperature and increasing the apparent viscosity in the samples with levels of soluble solids higher.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de frutas tropicais do mundo. De fato, em anos recentes, a produção e o processamento de frutas vêm se destacando como atividades de intenso dinamismo, tanto no nível nacional quanto no internacional (ABF, 2007). A manga é uma das frutas mais procuradas no mundo, e esta demanda tem se mostrado crescente. De acordo com as informações da EMBRAPA a procura tem aumentado bastante, o que tem refletido em preços compensadores. O Brasil está entre os nove principais países produtores de manga do mundo com uma área de 79 mil hectares e produziu em 2007 aproximadamente 1272 mil toneladas dessa fruta (IBGE, 2007). Desse total, exportou-se pouco mais de 20 %. Os 80 % restantes da produção destinaram-se a comercialização e consumo no mercado interno brasileiro.

As tentativas para a industrialização, em alguns setores não são bem sucedidas, e no setor frutícola não é diferente. Existem várias razões para que isso aconteça, entre essas, a falta de matéria-prima uniforme e em grande quantidade. O fato de a safra ser de curta duração deveria se constituir num incentivo à sua industrialização, o que permitiria a absorção do excesso de produção, além de possibilitar o consumo do produto industrializado na época em que a fruta fresca não pudesse ser encontrada.

A produção de frutas está sujeita a grandes flutuações de um ano para o outro. As frutas, em geral, são perecíveis, o que lhes dá uma vida útil muito curta no mercado da fruta *in natura*. Deste modo se impõe a necessidade da industrialização destas matérias primas para a produção de derivados, bem como de produtos finais para consumo tais como geléia, sucos, néctares, compotas e purês, ou como produtos intermediários para ser utilizados como ingredientes na elaboração de outros produtos tais como alimentos infantis, confeitarias, alimentos lácteos fermentados, etc.

O potencial por um crescimento forte e contínuo do mercado de polpas e sucos derivados da fruta aparece no futuro como um fato seguro. Há um conhecimento do consumidor, que cresce a cada dia, de que a frutas e as

bebidas provenientes de frutas são saudáveis, nutritivas, e são alimentos que podem beneficiar à saúde.

A indústria de alimentos ainda necessita desenvolver as áreas associadas a dados e informações sobre propriedades de transporte, a automação e as operações unitárias. Um completo conhecimento destas áreas auxiliará no avanço tecnológico da indústria alimentícia. Dados de propriedades termofísicas tais como, massa específica e difusividade térmica dos alimentos, são necessários para as análises dos problemas encontrados nas indústrias de alimentos. Atualmente, tem-se aumentado o interesse no estudo dessas propriedades e de suas respostas frente a diferentes condições de processamento que são submetidos os sistemas alimentícios. São de grande importância porque interferem no tratamento recebido pelo alimento durante o processamento, pelo fato, que as mesmas são o melhor indicador de outras propriedades e qualidade dos alimentos.

A estabilidade e aparência dos alimentos dependem das características reológicas e de sua composição química. A reologia desempenha um importante papel na formulação, fabricação e processamento de produtos alimentícios (HAMINIUK, 2005).

Assim, este trabalho é uma importante contribuição para a melhor compreensão sobre as propriedades térmicas, tais como difusividade térmica e massa específica, e do comportamento reológico da polpa de manga Ubá concentrada.

2. OBJETIVO

2.1- Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi determinar características físico-químicas da polpa de manga Ubá e avaliar o comportamento reológico e determinar a massa específica e difusividade térmica da polpa de manga Ubá em diferentes temperaturas (10, 25, 40, 55, 70) °C e diferentes concentrações de sólidos solúveis (5, 10, 15, 25, 30) °Brix.

2.2- Objetivos específicos

- ✓ Caracterizar as propriedades físico-químicas da polpa de manga Ubá: valor de pH, acidez total titulável, açúcares totais e redutores, sólidos solúveis totais e umidade.
- ✓ Determinar a massa específica e a difusividade térmica da polpa de Manga Ubá em função da temperatura e da concentração de sólidos solúveis.
- ✓ Determinar as propriedades reológicas da polpa de manga Ubá em função da temperatura e da concentração de sólidos solúveis.
- ✓ Avaliar o efeito da temperatura sobre o comportamento reológico da polpa de manga Ubá.
- ✓ Avaliar o efeito da concentração de sólidos solúveis no comportamento reológico da polpa de Manga Ubá.
- ✓ Estudar o efeito combinado da temperatura e concentração de sólidos solúveis sobre o comportamento reológico da polpa de Manga Ubá.
- ✓ Usar os modelos matemáticos de Ostwald-De-Waele, Herschel-Bulkley e Casson, para testar o ajuste aos dados experimentais e definir o tipo de comportamento reológico que a polpa de manga Ubá apresenta.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A mangueira é uma planta tropical, e é considerada uma espécie de boa adaptação a diferentes tipos de solo, em funções de vários aspectos inerentes à planta, que se desenvolve bem em condições de clima subtropical. Originária do Sul da Ásia, a manga dispersou-se por todos os continentes, sendo cultivada, em todos os países de clima tropical e subtropical (ROZANE et al., 2004).

O gênero *Mangifera* é apenas um entre outros 76 gêneros, com 600 espécies da família Anacardiaceae. A citada família é constituída, em sua maioria, de espécies tropicais, nativas na Ásia (CORREIA et al., 2006).

É possível que o cultivo da mangueira tenha sido originado na Índia, pela sua domesticação há 4 mil anos, oriundo de frutos menores e com pouca polpa. A introdução da manga na América, México e Panamá foi proveniente das Filipinas, o que justifica a predominância até pouco tempo da manga Manila, no México (DUVAL et al., 2005).

A região Nordeste é a principal região produtora de manga do país com 53% da produção nacional, sendo o Vale do São Francisco o eldorado brasileiro da produção e exportação de manga (ABF, 2007).

A manga é uma das frutas mais procuradas no mundo, e esta demanda tem se mostrado crescente. De acordo com informações da EMBRAPA, a procura tem aumentado bastante tanto no mercado interno quanto no externo, o que tem refletido em preços compensadores.

A manga destaca-se como uma fruta de alto valor comercial em muitas regiões do mundo, principalmente as regiões tropicais. Universalmente, é considerada uma das mais delicadas frutas do mundo, além de ter seu valor alimentar reconhecido (ABF, 2007). A manga pode ser consumida de diversas formas, a principal delas *in natura*, ou transformada em diferentes produtos, como geléias, gelatinas e polpa da fruta congelada (BENEVIDES et al., 2008).

O Brasil é um dos maiores produtores de manga, mas esta fruta é pouco valorizada no Brasil, sendo sua produção destinada ao mercado externo e uma parte da produção para o mercado interno. A demanda por frutas no mundo vem aumentando, o que amplia as perspectivas para os países produtores.

As principais variedades de Manga cultivadas no Brasil e de grande comercialização são: “Tommy”, “Haden”, “Keitt”, “Van”, “Dyke”, “Rosa” e “Ubá”. Existem outras variedades também, no entanto, de baixa comercialização.

3.1- Manga Ubá

A Manga Ubá é uma variedade bastante conhecida em algumas regiões do Brasil, sobretudo na região da Zona da Mata no estado de Minas Gerais. A mangueira Ubá está presente em todo o estado de Minas Gerais, desde os pomares domésticos aos plantios planejados, com produção destinada às agroindústrias (RAMOS et al., 2007).

É uma planta muito vigorosa, de porte elevado, podendo atingir mais de 10 m de altura quando não é feito o podamento (DONADIO, 1996). Sua árvore chega a render anualmente mais de mil frutos por planta. A fruta é pequena, variando de (100 a 150) g, oval, com cerca de 13 % de casca que é amarelada e fina. A polpa representa quase 70 % da fruta, e é firme, succulenta, doce e muito saborosa. Apresenta fibras finas e curtas (RAMOS et al., 2005).

A manga Ubá tem sua colheita concentrada no mês de dezembro a janeiro, que é um período de ocorrência de temperaturas e precipitações pluviométricas elevadas. É indicada tanto para consumo *in natura*, quanto para a industrialização devido ao sabor característico e acentuado da fruta. Uma das vantagens da industrialização é a manutenção da cor amarelo-claro e do aroma após processamento, além dos valores nutricionais da fruta, rica em potássio e vitaminas A e C (BENEVIDES, 2006; Manga Ubá, 2005).

3.2- Polpa de Fruta

A transformação da matéria-prima em polpa viabiliza sua utilização em inúmeros processos que abrangem desde a preservação em longo prazo, por congelamento ou adição de conservantes, até a possibilidade de concentração, de elaboração de novos produtos entre outros (FERREIRA *et al.*, 2002).

A polpa de fruta substitui a fruta *in natura* no preparo de sucos, néctares, doces, geléias, sorvetes, *baby foods* e apresenta a vantagem de estar disponível no mercado em período de entressafra da fruta (EVANGELISTA & VIEITES, 2006).

A polpa de fruta, por apresentar características de praticidade, vem ganhando grande popularidade. A indústria de polpas congeladas de frutas tem se expandido bastante nos últimos anos, notadamente no Nordeste brasileiro.

Segundo a Instrução Normativa nº 01 de 07 de janeiro de 2000, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), polpa de fruta é o produto não fermentado, não concentrado, não diluído, obtido de frutos polposos, através de processo tecnológico adequado, com um teor mínimo de sólidos totais, proveniente da parte comestível do fruto. O teor mínimo de sólidos totais é estabelecido para a polpa de cada espécie de fruta. As polpas devem ser preparadas com frutas sãs, limpas, isentas de matéria terrosa, de parasitas e detritos de animais ou vegetais. Não deverão conter fragmentos das partes não comestíveis da fruta, nem substâncias estranhas à sua composição normal. As características físicas, químicas e sensoriais deverão corresponder as originais da fruta, observando os limites mínimos e máximos estabelecidos, nas normas específicas, para cada polpa de fruta. Em relação as características físicas e químicas, os limites mínimos e máximos para a polpa de manga são estão relatados no Quadro 1:

Quadro 1- Limites mínimos e máximos das características físicas e químicas para a polpa de manga.

Características físicas e químicas	Mínimo	Máximo
pH	3,30	5,50
Sólidos solúveis a 20 °C (°Brix)	11,0	-
Acidez total titulável em ácido cítrico (g/100g)	0,32	-
Açúcares totais, provenientes da fruta (g/100g)	-	17,0
Sólidos totais (g/100g)	14,0	-

Fonte: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

O conhecimento das propriedades físicas de polpas de frutas é de grande interesse para as indústrias, pois, na fabricação de sucos, néctares, sorvetes, sobremesas, gelificados, iogurtes e outros, a fruta é geralmente utilizada na forma de polpa concentrada (FERREIRA *et al.*, 2002).

3.3- Propriedades termofísicas

O conhecimento das propriedades termofísicas e seu comportamento durante o processamento de alimentos são de fundamental importância para os cálculos de engenharia, a fim de reduzir os custos de operação e garantir a qualidade final dos alimentos.

3.3.1- Massa específica

Densidade absoluta ou massa específica é uma propriedade física das substâncias cujo valor se calcula pela relação entre certa massa da substância e o volume ocupado por essa massa. Massa específica relativa pode ser obtida pelo quociente entre a massa específica desse material e a massa específica de um padrão. No sistema internacional a unidade é o quilograma por metro cúbico (kg.m^{-3}).

Os conhecimentos a respeito das propriedades termofísicas da polpa de Manga Ubá ainda são limitados. Dentre estas, inclui-se a massa específica, propriedade importante na caracterização, identificação e utilização de substâncias ou de materiais. Muitos processos químicos, tais como a

fermentação, são controlados através da medida da massa específica. Dados sobre essa propriedade são, também, necessários para projetar e avaliar equipamentos de processamento de alimentos, como evaporadores, bombas, filtros e misturadores, e servem ainda como índice de qualidade do produto final (SILVA et al., 1990).

De acordo com ALVARADO e ROMERO (1989), a massa específica de sucos de frutas, podem variar devido a composição e quantidade de sólidos solúveis presentes. Vários autores propuseram equações para a determinação da massa específica de frutas e dos seus derivados, em função da concentração e da temperatura, e estas geralmente são polinomiais.

ZURITZ et al. (2005), trabalhando com suco de uva clarificado, com temperaturas e concentrações variadas, encontrou valores entre (1065,0 a 1358,4) kg/m³ e propuseram um modelo polinomial em função da temperatura e concentração para o cálculo da massa específica (equação 1):

$$\rho = 1,046 \times 10^3 + 1,963 \times 10^{-1}T + 3,8568C + 1,197 \times 10^{-3}T^2 + 1,653 \times 10^{-2}C^2 \quad (1)$$

em que:

ρ é a massa específica (kg.m⁻³);

C é a concentração de sólidos solúveis (°Brix);

T é a temperatura absoluta (K).

RAMOS e IBARZ (1998) propuseram um modelo (equação 2) ao trabalhar com suco de pêssigo clarificado, com diferentes concentrações e temperaturas, para estimar os valores para a massa específica:

$$\rho = 1006,56 - 0,5155T + 4,1951C + 0,0135C^2 \quad (2)$$

em que:

ρ é a massa específica (kg.m⁻³);

C é a concentração de sólidos solúveis (°Brix);

T é a temperatura (°C).

ALVARADO e ROMERO (1989) propuseram uma equação (3) para estimar valores de massa específica para polpas e sucos de frutas em geral:

$$\rho = 1002 + 4,61C - 0,460T + 7,001 \times 10^{-3} T^2 - 9,175 \times 10^{-5} T^3 \quad (3)$$

em que:

ρ é a massa específica (kg.m^{-3});

C é a concentração de sólidos solúveis (°Brix);

T é a temperatura (°C).

3.3.2- Difusividade Térmica

Muitos alimentos possuem características físicas que tornam a condução o modo primário de transferência de calor durante o processamento térmico. Estes alimentos são mais difíceis de aquecer, pois o corpo do alimento serve como isolante entre a fonte de calor e o centro do alimento. Para condições de transferência de calor por condução, as relações tempo/temperatura de um dado alimento podem ser calculadas se as condições de contorno de transferência de calor e a geometria do alimento forem matematicamente tratáveis e se a difusividade térmica do alimento for conhecida. O maior obstáculo para a aproximação matemática é a falta de dados das propriedades térmicas dos alimentos.

A difusividade térmica é definida como a razão entre a condutividade térmica e o calor específico do produto multiplicado por sua massa específica. A difusividade térmica é descrita ainda como a razão entre a habilidade em transferir calor e a capacidade de armazenar calor, em situações em que a transferência de calor ocorre em regime transiente (LEWIS, 1993).

Entre os trabalhos publicados podemos citar HAYES (1984), que trabalhou com polpa de mamão; BROWMIK e HAYAKAWA (1979), que trabalharam com polpas de tomate e maçã; SILVA (1997), que trabalhou com polpa de abacaxi. A difusividade térmica oscila nestes trabalhos entre ($1,0 \times 10^{-7}$ e $2,0 \times 10^{-7}$) $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$. GAFFNEY, *et al.* (1980), ao trabalhar com frutas e hortaliças, fizeram uma revisão dos métodos para determinar a difusividade térmica, com suas possíveis fontes de erro e condições assumidas em cada método e fizeram uma coletânea de dados de difusividade térmica existentes na literatura.

Calor específico de um material pode ser definido como a quantidade de energia térmica (J) necessária para elevar a temperatura em um grau Celsius por unidade de massa. (INCROPERA & DEWITT, 1992)

Condutividade térmica é a quantidade de calor que é transmitida por unidade de tempo entre duas superfícies, através de uma unidade de área, devido a um gradiente de temperatura. (INCROPERA & DEWITT, 1992)

Quando o calor específico, a massa específica e a condutividade térmica são conhecidas, a difusividade térmica pode ser calculada através da equação:

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p} \quad (4)$$

em que:

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

K é a condutividade térmica ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);

ρ é a massa específica ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

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

O método utilizado foi o método de DICKERSON (1965) no qual foi construído um aparato experimental utilizando condições de transferência de calor em regime transiente, que necessita apenas de dados de tempo e de temperatura para o cálculo da difusividade térmica dos alimentos. Esse aparato é constituído basicamente de uma cápsula cilíndrica metálica isolada nas extremidades, dois sensores de temperatura (um no centro do cilindro e outro na parede externa do cilindro), um banho termostático com agitação e um marcador de temperatura. A partir da equação de Fourier, sob condições de taxa constante de aumento de temperatura e com o gradiente de temperatura existindo somente no sentido radial, é possível fazer algumas modificações a partir de algumas condições, e pode ser representada da seguinte maneira:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (5)$$

em que:

A é a taxa constante de elevação de temperatura externa ao cilindro ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$);

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

t é o tempo (s);

r é o raio (m);

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

Se o termo $\frac{\partial T}{\partial t}$ não for dependente do tempo, a equação 5 pode ser escrita como:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{A}{\alpha} \quad (6)$$

Para um cilindro de raio R , cuja temperatura na superfície seja T_s , as condições de contorno usadas para a obtenção da equação 7 são:

$$T = At = T_s \quad (t > 0 ; r = R) \quad (7)$$

$$\frac{dT}{dr} = 0 \quad (t > 0 ; r = R) \quad (8)$$

Aplicando as condições de contorno acima, teremos a seguinte equação:

$$T_s - T_c = \frac{A}{4\alpha} (R^2 - r^2) \quad (9)$$

Para $r=0$, a equação 9 fica como:

$$T_s - T_c = \frac{A}{4\alpha} R^2 \quad (10)$$

em que:

T_s é a temperatura na superfície externa do cilindro (°C);

T_c é a temperatura no centro do cilindro (°C);

A é a taxa constante de elevação de temperatura externa ao cilindro (°C.s⁻¹);

R é o raio interno do cilindro (m);

α é a difusividade térmica (m².s⁻¹).

Alguns autores trabalhando com frutas ou derivados de frutas, utilizaram a metodologia de DICKERSON, para estimar a difusividade. Essas equações se encontram no Quadro 2:

Quadro 2- Equações para o cálculo da difusividade térmica.

Produto	Equação	Referência
Alimentos em geral	$\alpha = 0,088x10^{-6} + (\alpha_w - 0,088x10^{-6}).X_w$	Riedel (1969)
Alimentos em geral	$\alpha = (0,057363X_w + 0,000288T)10^6$	Martens (1980)
Suco de laranja	$\alpha = 7,9683x10^{-8} + 5,9839x10^{-8} X_w + 0,02510x10^{-8} T$	Telis-Romero (1998)

em que:

α é a difusividade térmica (m².s⁻¹);

α_w é a difusividade térmica da água (m².s⁻¹);

X_w é a fração mássica da água (adimensional);

T é a temperatura (°C).

3.4- Reologia

As medidas reológicas são consideradas como uma ferramenta analítica, a qual fornece uma melhor compreensão da organização estrutural dos alimentos. Vários fatores afetam o comportamento reológico das polpas de frutas, destacando-se entre estes, a temperatura, sólidos solúveis e o tamanho das partículas (VITALI et al., 1984).

A reologia é o estudo da deformação e escoamento da matéria. Estende-se desde a mecânica dos fluídos até a elasticidade de Rooke (STEFFE, 1992; RAO, 1999). A deformação ocorre no caso da matéria estar no estado sólido, e o escoamento, quando a matéria está no estado líquido. A propriedade reológica de interesse no caso dos sólidos é a elasticidade e no caso dos líquidos é a sua viscosidade. No entanto, alguns materiais não podem ser diferenciados em sólidos ou líquidos com clareza, de modo que a propriedade reológica de interesse nestes casos é a viscoelasticidade (PASQUEL, 1999; RAO, 1999).

A reologia é definida como a ciência que estuda a deformação e o escoamento de materiais em resposta a aplicação de uma tensão. O comportamento reológico de alimentos é complexo e desempenha um papel importante no processo de fabricação de alimentos. O termo reologia vem do grego *rheo* (escoamento) e *logos* (ciência), foi sugerido por Bingham e Crawford, para descrever a deformação de sólidos e a fluidez de líquidos (LEONARDI, 2001). O estudo do comportamento reológico consiste em aplicar uma força no material a ser investigado e medir sua deformação, ou então, mais freqüentemente, aplicar uma deformação e medir sua resistência ao escoamento. O equipamento utilizado neste caso é o reômetro.

A viscosidade faz parte das propriedades reológicas dos alimentos, que abrange, além dos fluidos, os sólidos e semi-sólidos. Alimentos em geral, podem ser classificados em sólidos, géis, líquidos homogêneos, suspensões líquidas e emulsões (RAO, 1999). Alimentos na forma líquida usados em processos na indústria ou pelo consumidor incluem purês, refrigerantes, ovos e seus produtos, leite e seus derivados, sucos de frutas naturais, concentrados vegetais e molhos, entre outros (IBARZ e BARBOSA-CÁNOVAS, 2002).

A viscosidade pode ser definida como a medida da fricção interna de um fluido, isto é, a resistência encontrada pelas moléculas em se moverem no interior de um líquido, devido às forças intermoleculares (GOULD, 1992). Esta fricção torna-se aparente quando uma camada de fluido move-se em relação à outra camada, assim à medida que aumenta a viscosidade do fluido, aumentam as forças de atrito e é necessária mais energia para que ocorra o

cisalhamento, que acontece sempre que o fluido é fisicamente movido ou distribuído, como no escoamento, espalhamento, aspersão, mistura etc. Isaac Newton foi o primeiro a expressar as leis básicas da mecânica clássica, descrevendo o comportamento de escoamento de um fluido ideal.

A força constante (F) necessária para manter a diferença na velocidade é proporcional ao gradiente de velocidade, de acordo com a equação 11, onde η é uma constante de proporcionalidade para um determinado material, definida como viscosidade. O gradiente de velocidade dv/dx é uma medida de mudança na velocidade onde as camadas intermediárias movem-se uma em relação às outras. Isso descreve o cisalhamento do fluido e é chamado de taxa de deformação ($\dot{\gamma}$), sua unidade de medida é s^{-1} . (BROOKFIELD ENGINEERING LABORATORIES, 1994):

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} \quad (11)$$

O termo $\frac{F}{A}$ indica a força dividida por área requerida para produzir cisalhamento, ou seja, tensão de cisalhamento (τ), sendo sua unidade de medida Pa (SCHARAMM, 2000).

Usando estas condições simplificadas, viscosidade pode ser definida matematicamente como descrita na equação 12:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (12)$$

em que:

η é a viscosidade (Pa.s);

τ é a tensão de cisalhamento (Pa).

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

Nos fluidos não-newtonianos, que não são homogêneos nem puros (como grande parte dos alimentos), usa-se o termo viscosidade aparente (η_a)

(GOULD, 1992). As unidades internacionais para viscosidade são Pascal.segundos (Pa.s) ou miliPascal.segundos (mPa.s).

Durante a produção, estocagem, transporte, exposição e consumo os alimentos sofrem contínuas variações de temperatura, por esta razão é importante saber as propriedades reológicas dos produtos em função da temperatura. Em fluidos não-newtonianos a viscosidade aparente é expressa por uma taxa de deformação fixa versus a viscosidade (IBARZ e BARBOSA-CÁNOVAS, 2002).

Os dados de comportamento são importantes reológicos na indústria de alimentos para:

- ✓ Realizar cálculos de engenharia de processos, englobando uma grande quantidade de equipamento tais como agitadores, extrusoras, bombas, trocadores de calor, tubulações e homogeneizadores.
- ✓ Determinar a funcionalidade de ingredientes no desenvolvimento de produtos.
- ✓ Controlar a qualidade do produto final ou intermediário.
- ✓ Avaliar a textura pela correlação com dados sensoriais (MASKAN; GOGUS, 2000)

A importância do conhecimento do comportamento reológico dos derivados de frutas está na sua utilização como medida de qualidade, além de ser indispensável em projetos, avaliação e operação dos equipamentos processadores de alimentos e de fundamental importância na economia de energia, o que, atualmente, se tornou extremamente importante a ponto de, cada vez mais, as operações de troca de calor e massa serem feitas de forma precisa (IBARZ e BARBOSA-CÁNOVAS, 1996).

3.4.1- Classificação reológica de fluidos

Fluido pode ser definido como uma substância que se deforma continuamente quando submetido a uma tensão de cisalhamento, não importando o quanto pequena possa ser esta tensão. De todas as propriedades

dos fluidos, a viscosidade requer uma maior atenção no estudo do escoamento de um fluido. A viscosidade é a propriedade do fluido que descreve a magnitude da resistência devido às forças cisalhantes dentro do fluido (SHARMA *et al.*, 2000).

3.4.1.1- Comportamento newtoniano

A principal classificação dos fluidos está em newtoniano e não-newtoniano, dependendo da relação que apresentam entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação aplicada.

Os fluidos newtonianos apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação dependendo apenas da temperatura e da composição do fluido. Em 1687, Newton estabeleceu essa relação, conhecida como Lei de Newton da viscosidade:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (13)$$

em que:

τ é a tensão de cisalhamento (Pa);

η é a viscosidade (Pa.s);

$\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação (s⁻¹).

3.4.1.2- Comportamento não-newtoniano

Os fluidos não-newtonianos apresentam uma relação não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação aplicada, e podem apresentar dependência ou independência em relação ao tempo, ou viscoelasticidade.

Para melhor compreensão do comportamento reológico destes fluidos deve-se introduzir o conceito de viscosidade aparente equação 14, já que para fluidos newtonianos a viscosidade é uma constante que não depende do tempo nem da taxa de deformação (VIDAL *et al.*, 2000).

$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \neq cte \quad (14)$$

em que:

η_a é a viscosidade aparente (Pa.s);

τ é a tensão de cisalhamento (Pa);

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

3.4.1.2.1- Comportamento independente do tempo

São aqueles cujas propriedades reológicas independem do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento (Figura 1).

Fluidos pseudoplásticos

São fluidos que iniciam o escoamento sob tensões cisalhantes infinitesimais. A maioria dos fluidos que apresentam comportamento não newtoniano pertence a este grupo (VIDAL et al., 2000). Os fluidos pseudoplásticos demonstram um decréscimo na viscosidade aparente quando há um aumento na tensão de cisalhamento. Esses fluidos em repouso apresentam um estado desordenado, e quando submetidos a uma tensão de cisalhamento, suas moléculas tendem a se orientar na direção da força aplicada. Quanto maior a tensão aplicada, maior será a ordenação e, conseqüentemente, menor será a viscosidade aparente.

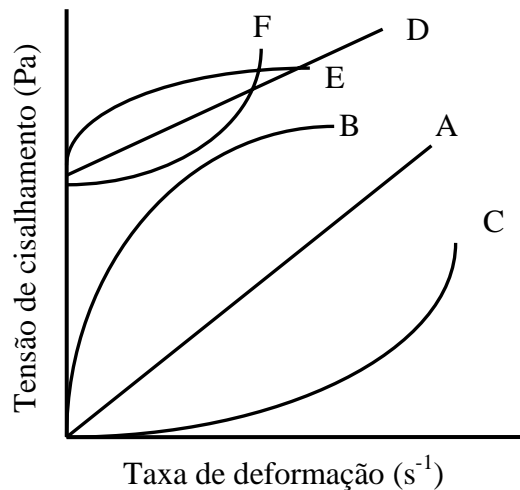
Alguns exemplos de fluidos alimentícios que apresentam comportamento pseudoplástico são: polpa de jabuticaba, polpa de manga natural e centrifugada, polpa de açaí em diferentes concentrações, misturas ternárias de polpa de manga e sucos de laranja e de cenoura (SATO e CUNHA, 2009; VIDAL et al., 2006; PEREIRA et al., 2003; BRANCO e GASPARETTO, 2003).

Fluidos dilatantes

Esses fluidos exibem um aumento da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação, que é observada em fluidos contendo alto nível de concentração de sólidos desfloclados, como lamas de argila, ingredientes de confeitaria, amido de milho em água e misturas de areia/água, além de alguns tipos de mel (POSSA e LIMA, 2000).

Fluidos plásticos de Bingham

Esse tipo de fluido necessita de uma tensão crítica ou tensão inicial (τ_0), para iniciar o escoamento. Materiais que exibem esse comportamento reológico, possuem uma estrutura interna capaz de impedir o escoamento para valores de tensão de cisalhamento inferiores a um valor inicial (τ_0). Quando a tensão de cisalhamento é maior que o valor inicial, o material começa a escoar, caso contrário ele se comporta como um sólido. Alguns exemplos de fluidos alimentícios que representam esse comportamento são: maionese, margarina, catchup e substâncias de cobertura (COSTA, 2006).



- | | |
|------------------|--------------------------------|
| A-Newtoniano | D-Plástico de Bingham |
| B-Pseudoplástico | E-Herschel-bulkley |
| C-Dilatante | F-Dilatante com tensão inicial |

Figura 1- Curvas de escoamento típicas para fluidos independentes do tempo. Fonte: adaptado de Ramos (1997).

3.4.1.2.2- Comportamento dependente do tempo

Os fluidos dependentes do tempo são classificados como tixotrópicos e reopéticos e exibem histerese, isto é, a viscosidade dos sistemas sujeitos a uma força por um intervalo de tempo “t” não é a mesma, quando medida no mesmo tempo “t”, depois de cessada a ação desta força. Para que seja possível verificar se o fluido apresenta ou não viscosidade aparente dependente do tempo, deve ser realizado um estudo reológico onde a substância em análise deve ser submetida a um incremento da tensão (ida) e, quando essa atingir um valor máximo, a tensão deve ser reduzida ao valor inicial (volta). Se a substância não apresenta comportamento reológico dependente do tempo, as curvas de tensão *versus* taxa de deformações obtidas (ida e volta) devem ser coincidentes. Entretanto, se a viscosidade aparente variar com o tempo, as curvas de ida e volta não seguem o mesmo caminho, formando uma histerese (Figura 2) (TONELI, 2006).

Os fluidos tixotrópicos são aqueles que apresentam um decréscimo na viscosidade aparente com o tempo de aplicação da tensão. No entanto, após o repouso, tendem a retornar à condição inicial de viscosidade. Têm-se como exemplos desse fluido as tintas e argilas, particularmente a bentonita, que se liquefaz por agitação e se solidifica quando em repouso, além de pastas de frutas, gelatinas, manteigas, iogurte, entre outros (POSSA e LIMA, 2000).

Os fluidos reopéticos, por sua vez, são aqueles que apresentam um acréscimo na viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação. Assim como os fluidos tixotrópicos, após o repouso o fluido tende a retornar ao seu comportamento reológico inicial. Este tipo de comportamento não é comum em alimentos, mas pode ocorrer em soluções de amido altamente concentradas. (POSSA e LIMA, 2000; COSTA, 2006).

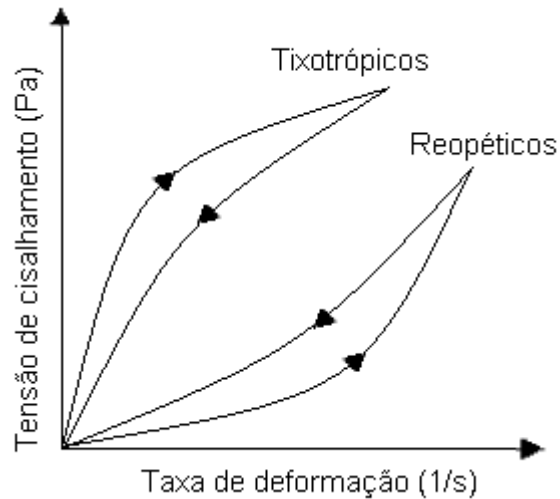


Figura 2- Comportamento reológico de fluidos dependentes do tempo. Fonte: SHARMA *et al.*, 2000.

3.4.1.2.3- Fluidos viscoelásticos

Estes tipos de fluidos apresentam características que não são previstas pela mecânica clássica de fluidos, eles são caracterizados por uma dependência da viscosidade em relação à taxa de deformação, pela presença de tensões normais em escoamentos e pela elevada resistência as deformações. Estes fluidos podem ser soluções de polímeros, suspensões de fibras, entre outros (DUARTE e OLIVEIRA, 2006). Clara de ovo é um exemplo típico de comportamento viscoelástico (VIDAL *et al*, 2000).

A Figura 3 esta apresentada a classificação dos fluidos segundo o comportamento reológico, o qual é determinado por medidas da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação, e a representação dos dados experimentais por reogramas e equações empíricas, em função da temperatura e,ou concentração (SARAVACOS e MAROULIS, 2001).

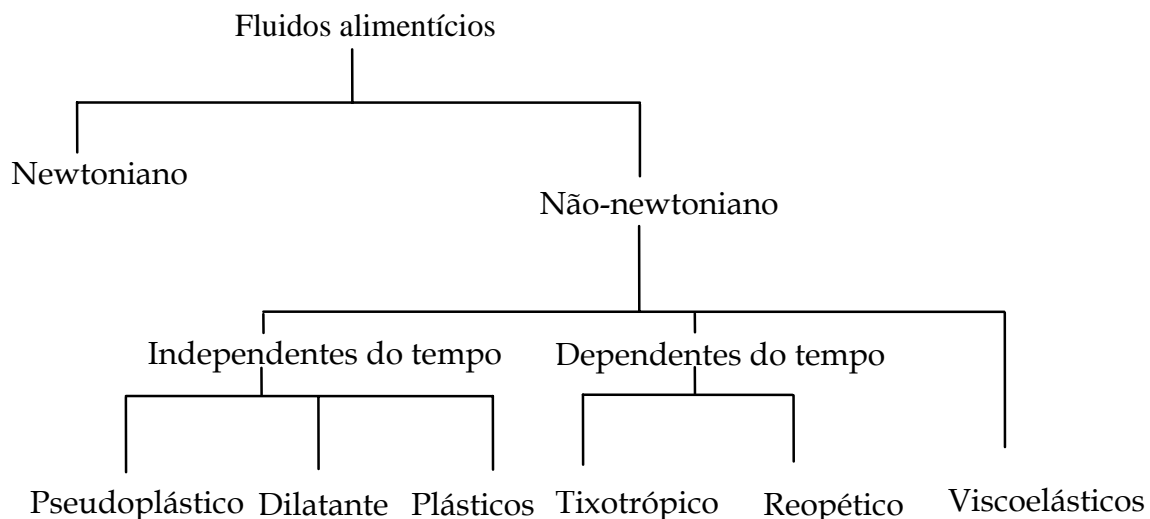


Figura 3: Classificação de fluidos segundo o comportamento do escoamento dos fluidos alimentícios (Adaptado de RAMOS, 1997)

3.4.2 Modelos matemáticos para fluidos inelásticos

Para se obter os parâmetros reológicos de fluidos inelásticos, normalmente recorre-se à utilização de modelos matemáticos, que relacionam a tensão de cisalhamento à taxa de deformação. O modelo mais simples é a Lei de Newton da viscosidade. No entanto, a utilização de modelos mais complexos torna-se necessária em virtude do fato de muitos fluidos alimentícios apresentarem comportamento não newtoniano, como as polpas de frutas. Na literatura existem muitos modelos matemáticos propostos, no entanto, os mais comumente utilizados são: Ostwald-De-Waele, Bingham, Herschel-Bulkley, Casson e Mizhari e Berk.

Modelo de Ostwald-De-Waele

Este modelo também é conhecido como Lei da Potência, e é bastante utilizado para descrever o comportamento reológico de fluidos alimentícios por ser um modelo simples e de ampla aplicação (BRANCO e GASPARETTO, 2003). A Equação que representa o modelo é a seguinte:

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \quad (15)$$

em que:

τ é a tensão de cisalhamento (Pa);

K é o índice de consistência (Pa.s);

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

n é o índice de escoamento do comportamento.

A viscosidade aparente (η_a) pode ser calculada pela equação:

$$\eta_a = K(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (16)$$

Quando o valor do índice de escoamento (n) for maior que a unidade, o modelo descreve o comportamento de fluido dilatante, quando (n) for menor que a unidade, o modelo descreve o comportamento de fluido pseudoplástico e quando n for igual à unidade, o modelo representa o comportamento newtoniano, com $K=\eta$.

Muitos autores utilizaram o modelo de Ostwald-De-Waele para descrever o comportamento reológico de produtos alimentícios, entre esses produtos estão: polpa de jabuticaba, misturas ternárias de polpa de manga e sucos de laranja e cenoura (SATO e CUNHA, 2009; BRANCO e GASPARETTO, 2003). Dentre os modelos utilizados para descrever o comportamento reológico da polpa de araçá integral, o modelo da Lei da Potência foi o que proporcionou os melhores ajustes aos dados experimentais.

Modelo de Bingham

O modelo de Bingham é uma adaptação do modelo de Ostwald-De-Waele para fluidos que apresentam índice de escoamento (n) igual à unidade, o que difere é a presença de uma tensão crítica (τ_0), pois o fluido só inicia o processo de escoamento quando a tensão de cisalhamento aplicada supera essa tensão inicial (VIDAL et al., 2000). A equação 17 descreve o modelo de Bingham:

$$\text{Se } \tau > \tau_0 \qquad \tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma} \qquad (17)$$

$$\text{Se } \tau \leq \tau_0 \qquad \dot{\gamma} = 0 \qquad (18)$$

Em que:

τ é a tensão de cisalhamento (Pa);

τ_0 é a tensão crítica (Pa);

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

η_{pl} é a viscosidade plástica de Bingham.

Neste modelo a viscosidade aparente η_a pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\text{Se } \tau > \tau_0 \qquad \eta_a = \eta_{pl} + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \qquad (19)$$

$$\text{Se } \tau \leq \tau_0 \qquad \eta = \infty \qquad (20)$$

Modelo de Herschel-Bulkley

A equação geral que descreve o comportamento de fluidos não-Newtonianos é o modelo de Herschel-Bulkley. Este modelo é uma adaptação da Lei da Potência, a diferença é a adição do termo de tensão crítica (τ_0). A equação 21 representa esse modelo:

$$\tau = \tau_0 + K_H (\dot{\gamma})^{n_H} \qquad (21)$$

Em que:

τ é a tensão de cisalhamento (Pa);

τ_0 é a tensão crítica (Pa);

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

K_H é o índice de consistência (Pa.s);

n_H é o índice de escoamento do comportamento (adimensional).

Para fluidos que se adéquam a este modelo, pode-se calcular a viscosidade aparente (η_a) com a seguinte equação:

$$\eta_a = K_H (\dot{\gamma})^{n_H-1} + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \quad (22)$$

Muitos autores utilizaram este modelo para descrever o comportamento reológico de produtos tais como: polpa de açaí em diferentes concentrações, suco de acerola, polpa de jaboticaba (PEREIRA *et al.*, 2003).

Diversos estudos mostraram que as polpas de frutas comportam-se como um fluido pseudoplástico, como resultado de complexas interações entre os açúcares solúveis, substâncias pécticas e sólidos suspensos. PELEGRINE *et al.* (2000), ao estudar o comportamento da polpa de manga integral, verificou que, o modelo de Herschel-Bulkley foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Modelo de Casson

Em 1959, Casson desenvolveu este modelo para um comportamento reológico de uma suspensão de partículas interagindo em um fluido newtoniano, e obteve a seguinte expressão (VANDRESEN, 2007):

$$(\tau)^{0,5} = K_{oc} + K_c (\dot{\gamma})^{0,5} \quad (23)$$

Em que:

K_{oc} é a tensão inicial (Pa);

K_c é a viscosidade plástica de Casson.

BRANCO e GASPARETTO (2005), ao estudar o comportamento reológico de misturas de polpa de manga e sucos de laranja e cenoura, utilizou o modelo de Casson para descrever o comportamento reológico da mistura.

Modelo de Mizrahi & Berk

MIZHARI e BERK (1972) mostraram que o modelo de Casson não se adaptava a baixos valores de taxa de deformação para o suco de laranja concentrado, o mesmo foi mostrado por outros autores para a polpa de manga (QUEIROZ *et al.*, 1999; VIDAL *et al.*, 2004). Dessa forma, o modelo de Mizhari

& Berk surgiu como uma modificação da equação de Casson, e foi criado para ser utilizado no estudo do escoamento de suco de laranja concentrado baseado na interação das partículas no meio de um dissolvente pseudoplástico. A Equação 24 representa o modelo proposto:

$$(\tau)^{0,5} = K_{OM} + K_M (\dot{\gamma})^{n_M} \quad (24)$$

em que:

K_{OM} é a raiz quadrada da tensão inicial ($\text{Pa}^{0,5}$);

K_M é o índice de consistência ($\text{Pa}^{0,5}\text{s}^n$);

n_M é o índice de escoamento do comportamento (adimensional).

Para este modelo a viscosidade aparente (η_d) pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\eta_d = K_d (\dot{\gamma})^{n_d+1} \quad (25)$$

Em que o índice d simboliza o dissolvente.

3.4.3- Modelos para fluidos tixotrópicos e reopéticos

Alguns fluidos alimentícios podem apresentar comportamento reológico dependente do tempo. A viscosidade aparente desses fluidos, para uma taxa de deformação constante, varia significativamente com o tempo. Esses fluidos mais comuns são os tixotrópicos, para os quais a viscosidade aparente diminui com o tempo de cisalhamento. Os fluidos reopéticos exibem o comportamento oposto, a viscosidade aparente aumenta com o tempo de cisalhamento (ABU-JDAYIL, 2003). É importante relatar que esse segundo tipo de comportamento ainda não foi encontrado em alimentos.

A dependência com o tempo surge em resposta ao cisalhamento contínuo resultando na degradação progressiva da estrutura da amostra (BASU et al., 2007). Assim, a tixotropia é o resultado da reorganização estrutural, com a diminuição da resistência do escoamento, e a reopexia a elaboração ou

reorganização de estrutura que provoca um aumento da resistência do escoamento (BARBOSA-CÁNOVAS *et al.*, 1993).

A caracterização das propriedades tixotrópicas é importante para estabelecer a relação entre a estrutura e o escoamento, sendo indispensável para a confecção de protocolos de armazenagem dos alimentos (FIGONI e SHOEMAKER, 1981).

O comportamento tixotrópico foi encontrado em muitos fluidos alimentícios, tais como polpa de marmelo (RAMOS, 1997), suco de laranja concentrado congelado (BRANCO e GASPARETTO, 2001), geléia de abacaxi (BASU, *et al.*, 2007).

O método mais utilizado para caracterizar a tixotropia é aplicar uma taxa de deformação constante e estudar a variação da tensão de cisalhamento com o tempo, e utilizar os modelos que descrevem essa variação para o ajuste aos dados experimentais (PAGÁN e IBARZ, 1999).

A modelagem do comportamento tixotrópico dos alimentos tem sido baseada em equações. Dos muitos modelos propostos para quantificar a dependência de tempo nos alimentos, serão destacados dois neste trabalho.

Modelo de Weltman

WELTMAN (1943) propôs um modelo (equação 26) que quantificasse a variação observada mediante os parâmetros A_0 e B_0 , que possibilita explicar o comportamento observado no escoamento de distintos alimentos, quando se aplica um cisalhamento.

$$\tau = A_0 + B_0 \cdot \ln \theta \quad (26)$$

em que A_0 é a medida da tensão tangencial necessária para que comece a degradar-se a estrutura; B_0 o coeficiente de destruição estrutural, que é definido como o produto da velocidade de destruição estrutural da amostra pelo tempo de cisalhamento (JIMÉNEZ *et al.*, 1987). Este modelo foi utilizado para analisar a dependência do tempo no escoamento em alimentos infantis

(ALONSO *et al.*, 1995). Também foi aplicado em géis de amido e alimentos semi-sólidos (ABU-JDAYIL, 2003). TÁRREGA *et al.* (2004), aplicou esse modelo em sobremesas lácteas comerciais.

Modelo de Figoni e Shoemaker

FIGONI e SHOEMAKER (1983), desenvolveram um modelo, que descreve a diminuição da tensão de cisalhamento por uma soma de funções cinéticas de primeira ordem:

$$\tau - \tau_e = \sum (\tau_{oi,i} - \tau_{e,i}) \exp(-K_i \theta) \quad (27)$$

em que: τ_e é a tensão de cisalhamento de equilíbrio que representa a estrutura remanescente, τ_o é a tensão de cisalhamento crítica correspondente ao tempo inicial e K_i a constante cinética de degradação estrutural.

Quando se aplica uma taxa de deformação constante a um fluido tixotrópico, a tensão de cisalhamento varia com o tempo até alcançar uma tensão de cisalhamento de equilíbrio (τ_e) depois de um determinado tempo (θ_e) (RAMOS, 1997). Se, no tempo inicial (θ_i), a tensão de cisalhamento tem um valor (τ_{oi}), a variação da tensão de cisalhamento para qualquer instante compreendido entre o tempo inicial e o de equilíbrio, pode se expressar a equação da seguinte maneira (IBARZ e LOZANO, 1992):

$$\tau = \tau_e + (\tau_{oi} - \tau_e) \cdot \lambda \quad (28)$$

em que λ é um parâmetro que depende do tempo e da estrutura do fluido; $(\tau_{oi} - \tau_e)$ representa a quantidade de estrutura degradada durante o cisalhamento.

IBARZ e LOZANO (1992) aplicaram o modelo de Figoni e Shoemaker e concluíram que a amostra de ameixa apresentava um menor comportamento tixotrópico, sendo esse de fácil eliminação e também aplicaram esse mesmo modelo para creme de pêssego.

3.4.4- Efeito de diferentes fatores sobre a viscosidade

3.4.4.1- Efeito da temperatura

A temperatura é um dos fatores que mais afeta a viscosidade das polpas de frutas, pois a maioria destas apresenta-se na forma de sólidos dispersos em meios líquidos. Um aumento da temperatura neste caso faz com que a viscosidade da fase líquida diminua, aumentando o movimento das partículas em suspensão, causando um decréscimo na viscosidade da polpa (PELEGRINE, 1999).

A temperatura tem um maior efeito no índice de consistência (K) em fluidos alimentícios não-newtonianos, sendo que o índice de escoamento ao comportamento (n) é afetado de forma moderada pela temperatura, mostrando um pequeno aumento em temperaturas elevadas.

O efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente pode ser descrito mediante uma equação análoga à de Arrhenius (VIDAL *et al.* 2000):

$$\eta_a = \eta_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (29)$$

em que:

η_a é a viscosidade aparente (Pa.s);

η_0 é uma constante (Pa.s);

E_a é a energia de ativação para escoamento viscoso (kJ.gmol⁻¹);

R é a constante dos gases (0,008314 kJ.gmol⁻¹.K⁻¹);

T é a temperatura absoluta (K).

A equação indica a tendência geral observada de uma diminuição da viscosidade aparente com o aumento da temperatura.

No caso de fluidos que apresentem comportamento não-newtoniano pode utilizar-se a viscosidade aparente η_a (equação 30) a uma taxa de deformação constante no lugar da viscosidade (RAO, *et al.*, 1984).

$$\eta_a = \eta_\infty \cdot \exp(E_a / RT) \quad (30)$$

Onde η_∞ é uma constante denominada viscosidade de deformação infinita.

Em geral todas as propriedades reológicas dos alimentos fluidos variam com a temperatura. A viscosidade, viscosidade plástica, viscosidade aparente e o índice de consistência diminuem com o aumento da temperatura para todos os líquidos. Mas o índice de comportamento ao escoamento não tem, em geral, uma tendência definida e tampouco é comum ser afetada pela temperatura (CRANDALL *et al.*, 1982). A tensão inicial, assim como a viscosidade, também diminui com a temperatura.

3.4.4.2- Efeito da concentração

O efeito da concentração sobre a viscosidade aparente de sucos de frutas é importante em aplicações tais como na concentração de fluidos alimentares. Em faixas limitadas de concentração e a uma taxa de deformação e temperatura fixas, o efeito da concentração de sólidos na viscosidade aparente pode ser descrito por relações do tipo exponencial ou do tipo potência conforme as equações (31) e (32), respectivamente (SILVA *et al.* 2005):

$$\eta_a = K_1 \cdot (C)^{A_1} \quad (31)$$

$$\eta_a = K_2 \cdot \exp(A_2 \cdot C) \quad (32)$$

em que: C - concentração de sólidos solúveis totais; A₁, A₂, K₁ e K₂ – constantes a serem determinadas.

Quando se trabalha com soluções ou suspensões, a viscosidade se mede em termos comparativos, isto é, a viscosidade de uma suspensão se compara com a viscosidade do dissolvente puro (RAO *et al.*, 1986;), e quando um polímero é dissolvido em um dissolvente, sua viscosidade aumenta acentuadamente (STEFFE, 1992). A concentração dos alimentos fluidos pode afetar também outros parâmetros reológicos. Para um fluido alimentício, um aumento da concentração comportará um aumento da viscosidade ou da

viscosidade aparente ou índice de consistência a uma determinada taxa de deformação.

A equação potencial proporcionou bons ajustes em alimentos mais viscosos tipo purês e a equação exponencial apresentou melhores resultados em sucos concentrados de frutas (RAO et al., 1986). Estes resultados foram comprovados por RAMOS (1997) ao trabalhar com suco de laranja concentrado e polpa de marmelo.

3.4.4.3- Efeito combinado em função da temperatura e da concentração

É de grande importância para a indústria de alimentos, obter uma única equação que relacione a viscosidade aparente do fluido com concentração e temperatura de trabalho, como também esse efeito combinado com a taxa de deformação, já que o comportamento do fluido do produto será influenciado de alguma maneira pela quantidade de transferência de movimento e de calor. Com esta finalidade, tem-se analisado diversas equações relatadas na literatura.

O efeito da temperatura e concentração sobre a viscosidade também pode combinar-se e duas Equações (33 e 34) são as mais aplicadas para descrever este efeito nos fluidos alimentícios (VITALI e RAO, 1984 ; IBÁRZ e SINTES, 1989; RAMOS, 1997):

$$\eta = a_1 \cdot C^{b_1} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (33)$$

$$\eta = a_2 \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT} + b_2 C\right) \quad (34)$$

em que: η é a viscosidade para os fluidos newtonianos e a viscosidade aparente para os fluidos não newtonianos.

3.4.5- Medidas reológicas

Para classificar um fluido reologicamente são necessários vários dados de tensão de cisalhamento e as correspondentes taxas de deformação para então, ajustar a um determinado modelo de comportamento reológico a esses dados e através dos parâmetros reológicos obtidos, classificá-los.

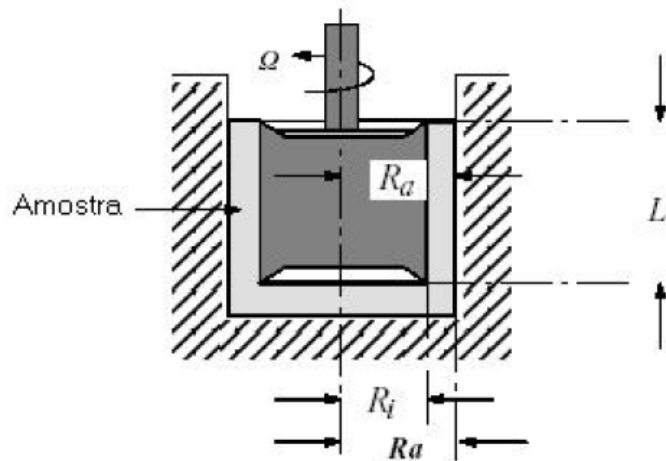
As principais vantagens na utilização dos reômetros rotacionais, é que esses equipamentos permitem o uso de pequenas amostras de produtos e fornecem uma medida contínua da relação taxa de deformação e a tensão de cisalhamento, permitindo também a análise mais adequada de comportamentos dependentes do tempo (VIDAL et al, 2000).

3.4.5.1- Reômetro rotacional de cilindros concêntricos

A medida dos parâmetros reológicos baseia-se na determinação da relação entre o torque necessário e a velocidade de rotação de um corpo que se encontra imerso ou em contato com o fluido. No caso do reômetro Searle, determina-se o torque necessário para manter constante a velocidade de rotação e no reômetro Couette, aplica-se um torque e mede-se a velocidade correspondente. (HAMINIUK, 2005)

O tipo de reômetro rotacional mais comum é do tipo Searle. Este pode apresentar várias configurações dependendo da geometria dos corpos rotacionais. Dessa forma, os reômetros rotacionais podem ser de cilindros concêntricos, cone e placa e placas planas paralelas. (HAMINIUK, 2005)

O reômetro rotacional de cilindros concêntricos mantêm uma velocidade de rotação constante a certa taxa de deformação e a tensão de cisalhamento é obtida através da medida do torque no cilindro. Estes equipamentos são projetados para causar um cisalhamento no fluido localizado entre dois cilindros concêntricos, sendo que um gira e outro permanece estacionário permitindo-se obter curvas reológicas (VIDAL et al, 2000).



Onde: Ω = velocidade do rotor, R_a = raio do rotor, R_i = raio do cilindro de medida e L = altura do rotor.

Figura 4- Diagrama esquemático do reômetro de cilindro concêntrico tipo Searle. Fonte: HAMINIUK, 2005.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1- Obtenção da polpa de manga Ubá concentrada

A polpa de manga Ubá foi fornecida pela *Goody Indústria de Alimentos S.A.* e foi adquirida numa concentração média de sólidos solúveis de 16 °Brix. A concentração das amostras foi efetuada num evaporador rotativo à vácuo vertical, marca MARCONI, modelo MA-120, no Laboratório de Processamento de Frutas e Hortaliças, da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – Minas Gerais. . A temperatura média utilizada para a concentração das polpas foi de 50 °C.



Figura 5- Evaporador rotativo à vácuo vertical. (Laboratório de Processamento de Frutas e Hortaliças – Dep. de Engenharia de Alimentos, UFV)

4.2- Caracterização físico-química da polpa de Manga Ubá

4.2.1- Análise de pH

O pH é um termo que expressa a intensidade da condição ácida ou básica de um determinado meio. O valor do pH foi determinado diretamente

nas amostras por potenciometria, utilizando-se um medidor de pH, marca TECNOPON, modelo mPA 210, conforme AOAC (1997).

4.2.2- Análise do teor de sólidos solúveis totais

O teor de sólidos solúveis totais foi determinado através leitura direta com um refratômetro digital de bancada modelo WYA-2S, marca ABBE, e os resultados foram expressos em °Brix, conforme AOAC (1997).

4.2.3- Análise da acidez total titulável

O método utilizado para o cálculo da ATT (acidez total titulável) consistiu na titulação de uma alíquota da amostra por uma base forte de concentração conhecida (NaOH 0,1 N). O final da titulação foi determinado por um indicador. O indicador utilizado foi a fenolftaleína e a porcentagem de acidez foi expressa em % de ácido cítrico por 100 g de amostra, segundo GOMES (2007).

4.2.4- Análise da Umidade

O teor de umidade da polpa de manga Ubá foram determinados através do método gravimétrico com emprego de calor, com base na perda de massa das amostras submetidas ao aquecimento em estufa a 105°C até peso constante, conforme AOAC (1997).

4.2.5- Análise de açúcares totais e redutores

Para a determinação de açúcares na polpa foi utilizado o método volumétrico de Eynon-Lane, segundo AOAC (1997). Sais de Cu^{2+} em solução alcalina, na forma de um complexo com tartarato, são reduzidos em presença de açúcar redutor, com formação de um precipitado vermelho de óxido cuproso e o ácido correspondente.

4.3- Determinação de propriedades termofísicas

4.3.1- Massa específica

A massa específica da polpa de manga Ubá foi determinada através do método do picnômetro. As análises foram realizadas em 3 repetições nas temperaturas (10, 25, 40, 55, 70) °C e nas concentrações (10, 15, 20, 25, 30) °Brix, utilizando um picnômetro de vidro de 25 mL de capacidade. Os picnômetros foram previamente calibrados com água destilada em cada temperatura. Os picnômetros foram preenchidos com as amostras de polpa de manga e em seguida colocados em um banho termostático, marca Marconi, até atingirem a temperatura desejada. Em seguida, foram pesados em balança analítica, com precisão de 0,0001 g. As massa específicas das amostras foram calculadas pela razão entre a sua massa e seu volume determinado no picnômetro.

4.3.2- Difusividade térmica

A difusividade térmica das amostras de polpa de manga Ubá foi determinada por um método similar ao utilizado por DICKERSON (1965). O aparato utilizado consistiu de uma cápsula metálica cilíndrica de um material de alta condutividade térmica (alumínio, isolada em suas extremidades com tampas de nylon; de dois termopares, um localizado exatamente no centro da cilindro que forneceu as temperaturas da amostra ($r=0$) e o outro na superfície externa do cilindro, que forneceu a temperatura da amostra na posição de $r=R$; de um indicador de temperatura; de um banho termostático, marca MARCONI e um agitador mecânico. A cápsula metálica tinha um diâmetro interno de 0,025 m e 0,12 m de comprimento.

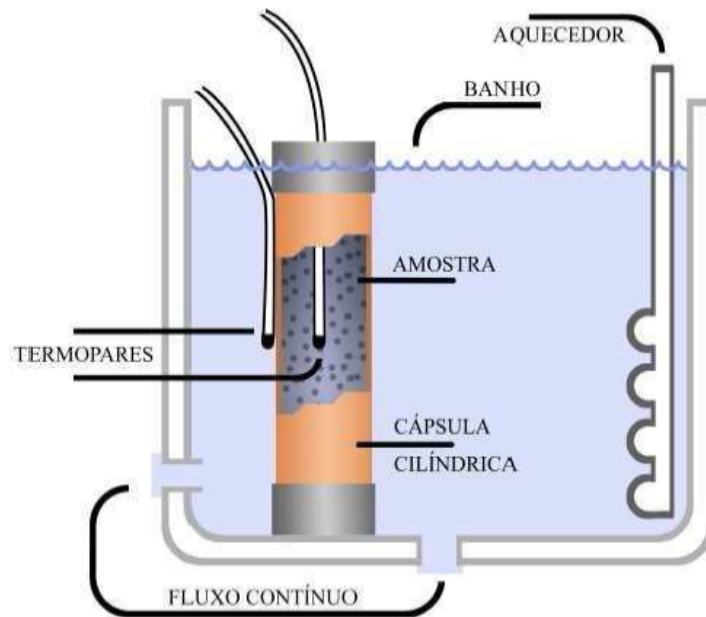


Figura 6- Esquema do aparato utilizado para determinação da difusividade térmica. Fonte: MATTOS, 2007.

Em cada repetição a cápsula cilíndrica foi recheada com as amostras de polpa de manga, fechada com a tampa superior, onde o termopar é inserido, com total imersão na amostra. Todo esse aparato foi imerso em um banho termostático. A agitação mecânica foi ligada juntamente com o banho termostático, que aqueceu a uma taxa constante de aproximadamente $0,64\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. No momento em que o banho foi ligado, o sistema de aquisição de dados começou a registrar a variação da temperatura com o tempo. Os dados foram coletados num intervalo de 30 s. A temperatura inicial do banho e da amostra se encontravam em torno de $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para se obter os valores de (A) e a diferença $(T_s - T_c)$ foi utilizado o gráfico temperatura versus tempo. A taxa de aquecimento do banho (A) foi obtida através da inclinação da reta (T_s) versus tempo e a diferença $(T_s - T_c)$ foi obtido quando as duas curvas (T_s) e (T_c) se tornaram paralelas.

Tendo-se em vista as condições em que o experimento foi conduzido, a difusividade térmica pôde ser determinada utilizando-se a equação 10 proposta por Dickerson.

4.4- Caracterização reológica

4.4.1- Estudo do comportamento tixotrópico

O estudo tixotrópico das polpas de manga Ubá nas cinco diferentes temperaturas (10, 25, 40, 55 e 70) °C e cinco diferentes concentrações (10, 15, 20, 25, 30) °Brix, foi realizado em um reômetro rotativo da marca HAAKE, modelo Modular Advanced Rheo System (Figura 7), e utilizou-se o sensor (tipo cilindros concêntricos) Z20 Din para todos os ensaios. Foi estudada a variação da tensão de cisalhamento em função de uma taxa de deformação constante $\dot{\gamma} = 30 \text{ s}^{-1}$, num tempo de 600 s. As leituras dos dados foram feitas num intervalo de 6 segundos por um software (HAAKE Rheo Win 3). Para cada amostra foi realizada duas repetições.

Para quantificar as medidas dependentes do tempo nas concentrações e temperaturas avaliadas e na taxa de deformação selecionada, os modelos de Weltman (equação 24) e de Figoni e Shoemaker (equação 26) foram ajustados aos dados obtidos, sendo utilizado o programa computacional para análises estatísticas SAS[®] (Statistical Analysis System – SAS Institute Inc., North Carolina, USA 1999) versão 9.1, licenciado pela Universidade Federal de Viçosa. Para escolha do melhor modelo foram comparados os valores de coeficiente de determinação (R^2).

4.4.2- Comportamento do escoamento

O comportamento do escoamento da polpa de Manga Ubá nas cinco temperaturas (10, 25, 40, 55 e 70) °C e cinco concentrações (10, 15, 20, 25, 30) °Brix, foi determinado num reômetro rotacional, marca HAAKE, modelo Modular Advanced Rheo System utilizando o sensor Z20 Din. As medidas de tensão de cisalhamento (τ) e a estimativa da viscosidade aparente (η_a) foram realizadas aplicando uma rampa contínua de taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) variado de 0 a 500 s^{-1} durante um tempo de 120 s para a curva ascendente e 120 s para a curva descendente. As medidas foram tomadas a cada 4 s, por um software (HAAKE Rheo Win 3), totalizando 30 pontos em cada ensaio, sendo

assumido o valor médio da tensão de cisalhamento em cada valor de taxa de deformação. Antes de cada experimento houve a quebra da tixotropia das amostras de polpa de manga Ubá, a uma taxa de deformação constante de 100 s^{-1} por um tempo de 180 s. Para cada amostra foram realizadas 2 repetições.

Os modelos de Hershel-Bulkley (equação 21) e Casson (equação 23) foram ajustados aos dados reológicos obtidos. O valor da viscosidade aparente a uma taxa de deformação de 100 s^{-1} , foi calculada utilizando os parâmetros da equação do modelo que teve melhor ajuste.

Para ajustar os modelos aos dados experimentais foi utilizado o pacote estatístico SAS[®] (Statistical Analysis System – SAS Institute Inc., North Carolina, USA 1999) versão 9.1, licenciado pela Universidade Federal de Viçosa. Para escolha do melhor modelo foram comparados os valores de coeficiente de determinação (R^2), nível de significância e quadrado médio do erro (QME).



Figura 7 - Reômetro rotativo da marca HAAKE, modelo Modular Advanced Rheo System

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1- Caracterização físico-química da polpa

Na Tabela 1 são apresentados os resultados das propriedades físico-químicas da polpa de manga Ubá. Esses valores se referem à média das três repetições.

Tabela 1- Características físico-químicas e coordenadas da coloração da polpa de manga Ubá.

Propriedades Físico-químicas	Média ± DP
Umidade (%)	82,17 ± 0,55
Sólidos solúveis totais (°Brix)	16,00 ± 0,29
Acidez total titulável (%ácido cítrico/100g)	0,37 ± 0,02
Relação SST/ATT (ratio)	43,24
pH	4,05 ± 0,11
Açúcares redutores (%glicose)	6,55 ± 0,47
Açúcares totais (% glicose)	10,59 ± 0,33
Açúcares não-redutores	4,04

DP- Desvio padrão; SST- Sólidos solúveis totais; ATT- Acidez total titulável

Os valores obtidos para a caracterização físico-química da polpa de manga Ubá são semelhantes aos encontrados nos trabalhos de FARAONI (2006); BENEVIDES et al., (2008); GONÇALVES (1998).

5.2- Propriedades termofísicas

5.2.1- Massa específica

Os resultados experimentais obtidos para a massa específica da polpa de manga Ubá a diferentes concentrações e diferentes temperaturas são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores experimentais de massa específica de polpa de Manga Ubá em função da temperatura e concentração de sólidos solúveis.

C (°Brix)	10	15	20	25	30
T (°C)	Massa específica (kg.m ⁻³)				
10	1042,40	1050,47	1059,22	1095,31	1102,57
25	1038,06	1046,76	1049,70	1089,60	1097,39
40	1033,16	1039,62	1044,06	1082,53	1091,36
55	1029,16	1033,07	1037,37	1073,15	1083,52
70	1019,78	1025,86	1032,56	1067,55	1072,83

Os resultados experimentais obtidos para a massa específica, encontram-se na mesma faixa de valores obtidos por DANTAS JÚNIOR et al., (2007) para polpa de manga espada, por RAMOS e IBARZ, (1998) para sucos de pêsego e por ALVARADO e ROMERO, (1989) para polpas e sucos de frutas em geral.

Verifica-se um aumento do valor da massa específica das amostras, com a elevação da concentração, assim como a redução dessa variável em todas as amostras, com o incremento da temperatura (Figura 8).

O efeito da temperatura a uma determinada concentração sobre a massa específica de polpas e de sucos de frutas, bem como a influência da concentração em uma dada temperatura, tem sido estudado por diversos autores (RAMOS e IBARZ 1998; ARAÚJO et al. 2002; TELIS-ROMERO et al. 1998; CEPEDA e VILLARÁN 1999; MATTOS 2007).

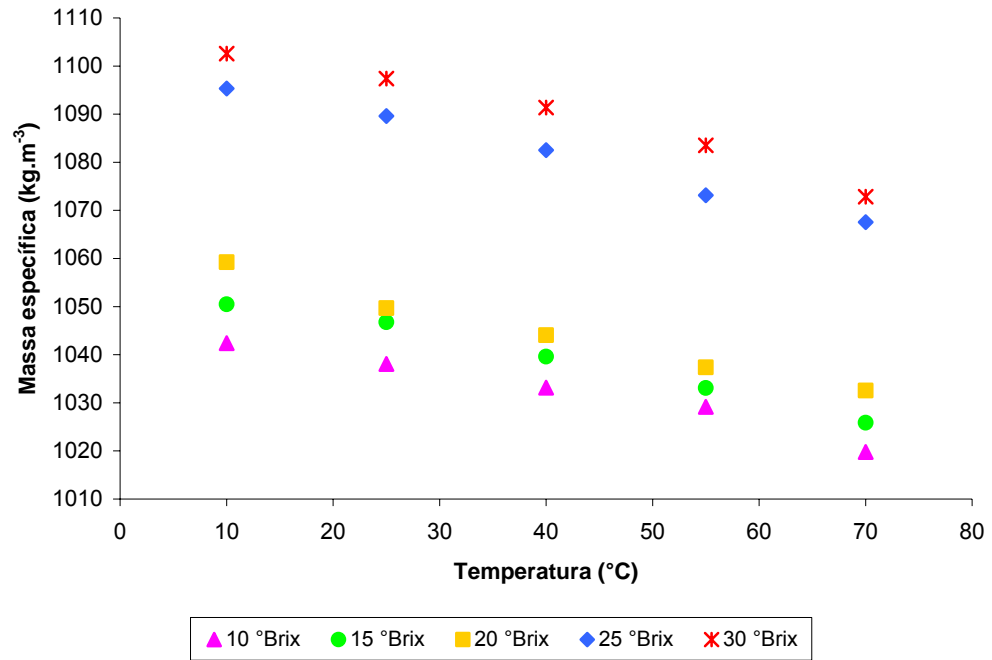


Figura 8- Massa específica de polpa de manga Ubá em diferentes concentrações de sólidos solúveis em função da faixa de temperatura estudada.

Através dos valores experimentais, propôs-se um modelo para prever a massa específica de polpa de manga Ubá em função da concentração e da temperatura. A equação que melhor se ajustou aos dados experimentais foi do tipo polinomial, onde a massa específica variou de forma polinomial com a concentração e de forma linear com a temperatura. Apresentando um coeficiente de determinação de 0,933.

$$\rho = 1034,95 - 0,4570T + 0,3340C + 0,0740C^2 \quad R^2=0,933 \quad (35)$$

em que:

ρ é a massa específica (kg.m⁻³);

T é a temperatura (°C);

C é a concentração em sólidos solúveis (°Brix)

Fez-se uma comparação entre os valores de massa específica obtidos através das equações (2 e 3) propostas em literatura para diferentes concentrações e diferentes temperaturas com os valores obtidos experimentalmente (Figura 9). Os valores experimentais situaram-se abaixo

dos valores encontrados pelas equações 2 e 3, exceto na concentração de 10 °Brix nas temperaturas de (55 e 70) °C.

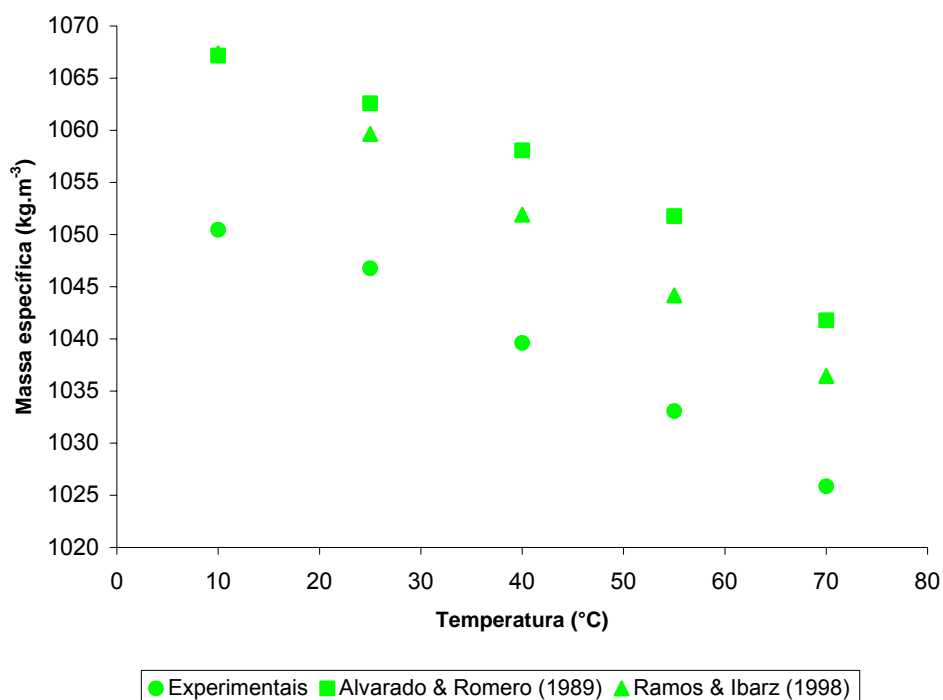


Figura 9 - Valores experimentais de massa específica de polpa de Manga Ubá a 15 °Brix em função da temperatura (°C) e modelos teóricos encontrados na literatura.

Observou-se que, o modelo proposto para suco de pêssago (RAMOS e IBARZ, 1998), quando comparado com o modelo proposto para esse trabalho, foi o que apresentou diferenças percentuais menores, variando entre 0,10 a 3,34 %. As menores diferenças percentuais foram verificadas na concentração de 10 °Brix.

A equação polinomial predita usando os valores experimentais de massa específica pode ser indicada para estimar a massa específica da polpa de Manga Ubá em função da temperatura e da concentração, como pode ser observado na Figura 10.

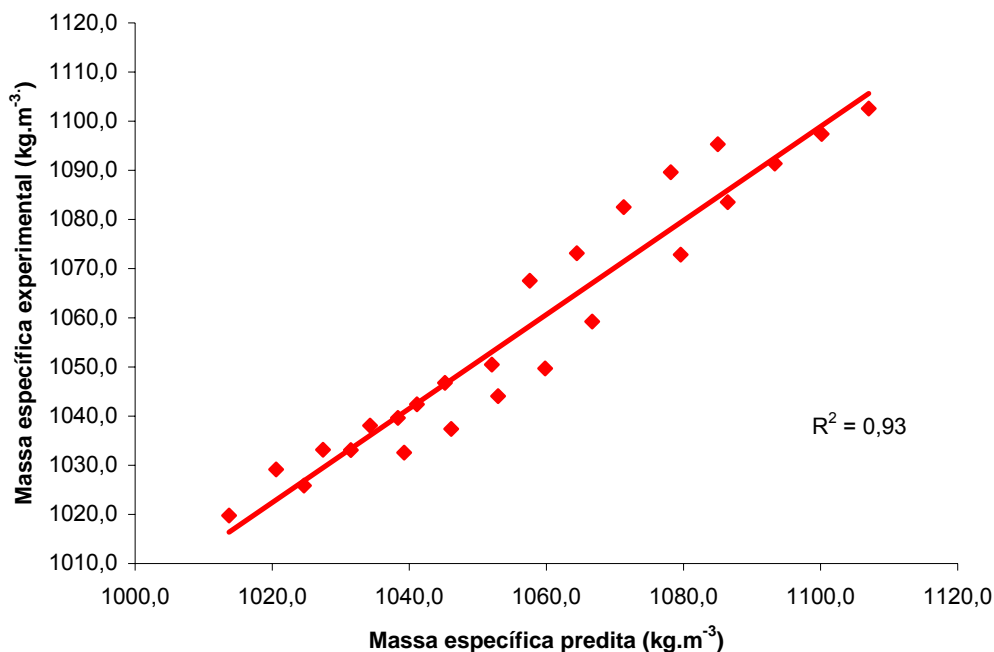


Figura 10 – Relação entre a massa específica experimental e a massa específica predita (equação 35) para a polpa de manga Ubá a diferentes concentrações e temperaturas.

5.2.2- Difusividade Térmica

Na Tabela 3 são apresentados os valores experimentais da determinação da difusividade térmica da polpa de Manga Ubá, calculados utilizando-se os valores estimados para os parâmetros A, $(T_s - T_c)$ e R_c . A difusividade térmica foi determinada pelo método de DICKERSON (1965), em que A teve o valor de 0,64 °C/minuto.

Tabela 3 - Dados experimentais da difusividade da polpa de manga Ubá a diferentes concentrações e temperaturas.

C (°Brix)	10	15	20	25	30
T (°C)	Difusividade Térmica ($\cdot 10^{-7} \cdot m^2 \cdot s^{-1}$)				
10	1,03	1,01	0,98	0,94	0,88
25	1,10	1,07	1,05	1,02	0,95
40	1,23	1,21	1,14	1,09	1,05
55	1,35	1,32	1,22	1,12	1,07
70	1,65	1,62	1,47	1,42	1,47

Verifica-se, também, observando-se a Tabela 3 que a difusividade decresce como o aumento da concentração de sólidos das amostras, exceto na concentração de 30 °Brix a 70 °C. Esse comportamento significa fisicamente que, o aumento da concentração diminui a velocidade com que o calor se propaga ou se difunde através da polpa, a qual é representada pelo valor da difusividade, sendo uma propriedade muito importante para a otimização de processos dentro dos cálculos da engenharia.

MUNIZ et al. (2006), trabalhando com polpa de bacuri com concentrações entre (5 à 20) °Brix, constatou que a difusividade térmica também diminuiu com o aumento da concentração.

Os dados experimentais da difusividade térmica se encontram na faixa de $0,9 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ à $1,65 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, que é próxima de valores apresentados na literatura. Assim, SIMÕES e MURR (1997) para polpa de Manga encontraram valores que variavam numa faixa de $1,28 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ à $1,41 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. ALVARADO (1994) que trabalhou com polpa de mamão e BHOWMIK & HAYAKAMA (1979) com polpa de tomate e maçã relataram a variação de difusividade térmica entre $1,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ à $2,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. MATTOS (2007) para diversas frutas encontrou dados entre $1,17 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ à $2,02 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

A equação 36 pode ser usada para o cálculo da difusividade em função da concentração de sólidos e da temperatura da polpa de manga Ubá. A difusividade térmica varia linearmente com a concentração e de forma polinomial com a temperatura. O coeficiente de determinação foi de 0,944.

$$\alpha = 0,12065 \times 10^{-6} - 0,1082 \times 10^{-8} C - 0,2181 \times 10^{-9} T + 0,1323 \times 10^{-10} T^2 \quad (36)$$

em que:

α é a difusividade térmica (m^2/s);

C é a concentração de sólidos solúveis (°Brix);

T é a temperatura (°C).

Dados de difusividade térmica obtidos experimentalmente e por meio da equação 36 estão apresentados na Figura 11. A equação polinomial pode ser

usada para estimar a difusividade da polpa de Manga Ubá em função da temperatura e da concentração.

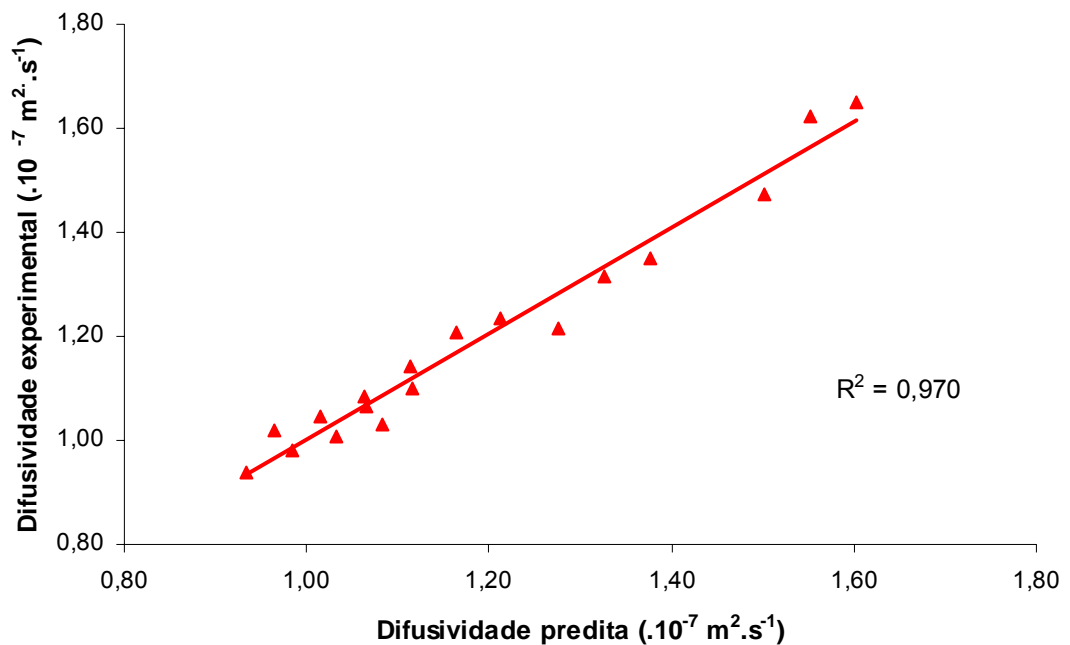


Figura 11 - Relação entre a difusividade experimental e a difusividade predita segundo a equação 36 para a polpa de manga Ubá a diferentes concentrações e temperaturas.

5.3- Caracterização reológica

5.3.1- Estudo do comportamento tixotrópico

Nos tixogramas obtidos são mostrados a variação da tensão de cisalhamento com o tempo a uma taxa de deformação constante de 30 s^{-1} , a diferentes temperaturas, para a polpa de manga Ubá nas concentrações de (10, 15, 20, 25 e 30) °Brix. Os modelos de Weltman (Figura 12) e Figoni e Shoemaker (Figura 13) foram ajustados aos dados. A tensão de cisalhamento diminuiu com o tempo de aplicação da taxa de deformação. ALONSO et al. (1995), encontrou comportamento semelhante para derivados de frutas.

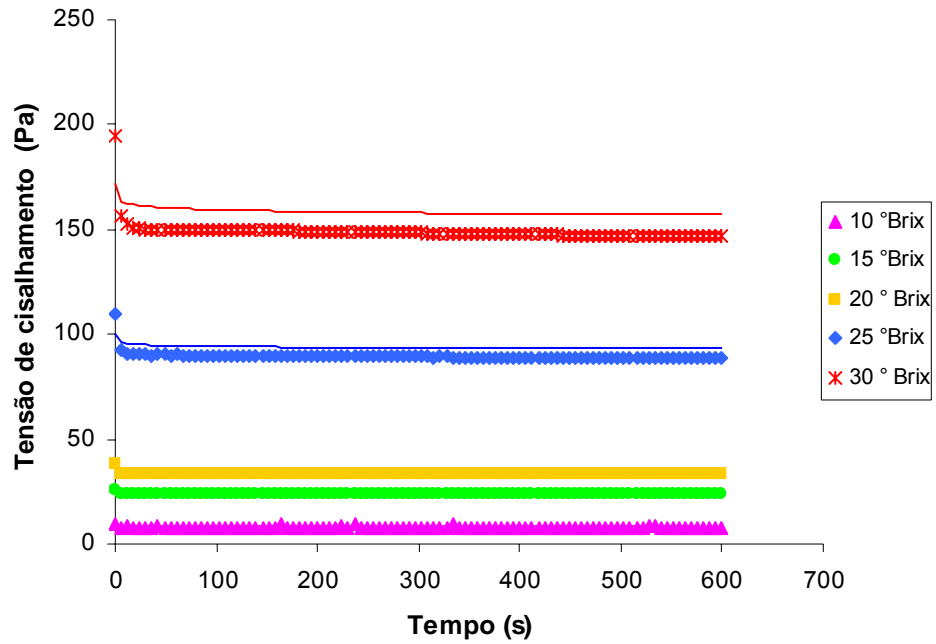


Figura 12- Relação entre tensão de cisalhamento e tempo à taxa de deformação constante de 30 s^{-1} com ajuste pelo modelo de Weltman para diferentes concentrações de polpa de manga Ubá a temperatura de $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

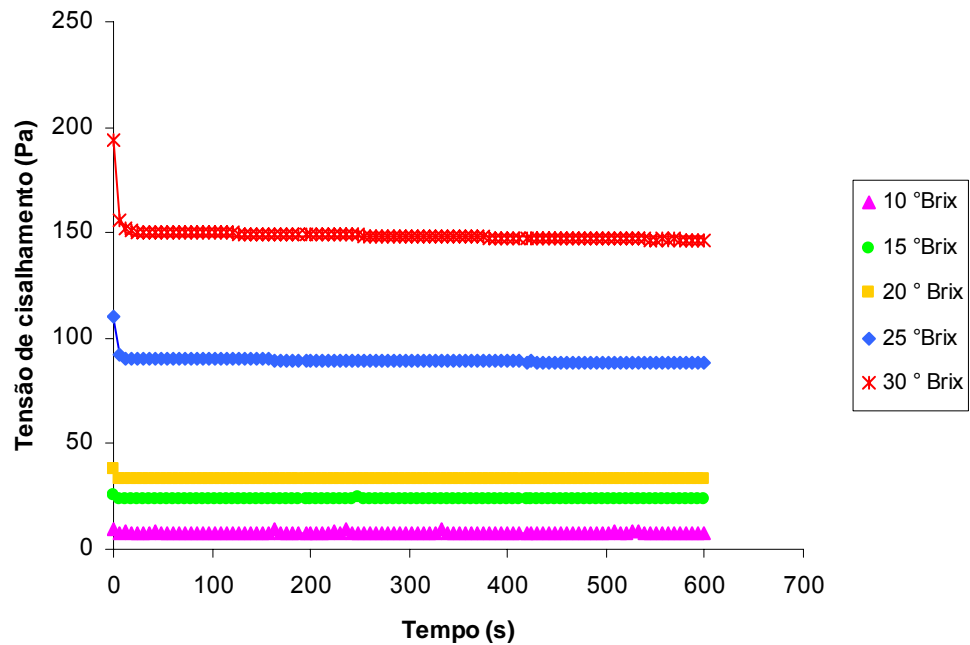


Figura 13- Relação entre tensão de cisalhamento e tempo à taxa de deformação constante de 30 s^{-1} com ajuste pelo modelo de Fignoni & Shoemaker para diferentes concentrações de polpa de manga Ubá a temperatura de $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Observou-se nas Figuras (12 e 13) a influência que a concentração exerce no comportamento tixotrópico da polpa de manga Ubá. Verifica-se que a tensão de cisalhamento apresenta menor dependência do tempo quando se diminui a concentração de sólidos solúveis. Portanto para concentrações maiores, principalmente nos primeiros segundos, é o momento em que a tensão de cisalhamento reduz rapidamente com o tempo de deformação. Também mostrou que nas concentrações mais baixas de sólidos solúveis, (10 e 15) °Brix, não apresentou características tixotrópicas e que a polpa de manga Ubá a 20 °Brix apresentou um pequeno comportamento tixotrópico.

Os modelos de Weltman e Figoni e Shoemaker, equações 26 e 28, respectivamente, foram ajustados aos valores experimentais obtidos para as 5 concentrações estudadas na temperatura de 10 °C. Os parâmetros de Weltman (A e B) e parâmetros de Figoni e Shoemaker τ_{0i} , τ_e , $(\tau_{0i} - \tau_e)$ e K_i estão apresentados nas Tabelas 4 e 5 respectivamente. Os parâmetros estimados foram significativos ($p < 0,0001$).

Tabela 4 - Valores médios para os parâmetros A e B para a polpa de manga Ubá a temperatura de 10 °C para as distintas concentrações estudadas.

T (°C)	C (°Brix)	A (Pa)	- B (Pa)	R ²
	10	8,47 ± 0,15	0,13 ± 0,03	0,173
	15	24,38 ± 0,06	0,12 ± 0,01	0,552
10	20	34,69 ± 0,12	0,26 ± 0,02	0,574
	25	97,13 ± 0,38	1,43 ± 0,07	0,808
	30	165,76 ± 0,87	3,15 ± 0,16	0,799

A: Tensão necessária para começar a degradação da estrutura, B coeficiente de degradação estrutural.

Tabela 5 - Valores médios para os parâmetros τ_{oi} , τ_e , $(\tau_{oi} - \tau_e)$ e K_i para a polpa de manga Ubá a temperatura de 10 °C para as distintas concentrações estudadas.

T (°C)	C (°Brix)	τ_{oi} (Pa)	τ_e (Pa)	$\tau_{oi} - \tau_e$ (Pa)	K_i (s ⁻¹)	R ²
	10	9,40 ± 0,40	7,77 ± 0,04	1,63 ± 0,36	4,87 ± 0,00	0,135
	15	25,60 ± 0,11	23,72 ± 0,01	1,88 ± 0,10	0,46 ± 0,16	0,737
10	20	37,89 ± 0,05	33,26 ± 0,01	4,64 ± 0,04	0,48 ± 0,03	0,989
	25	109,84 ± 0,61	89,28 ± 0,06	20,55 ± 0,54	0,29 ± 0,03	0,922
	30	194,19 ± 1,18	148,41 ± 0,12	45,78 ± 1,06	0,26 ± 0,02	0,940

τ_{oi} : Tensão crítica, τ_e : Tensão de equilíbrio, $\tau_{oi} - \tau_e$: Quantidade de estrutura degradada durante o cisalhamento, K_i : Constante cinética de degradação estrutural

O estudo tixotrópico apresenta duas etapas. A primeira etapa se caracteriza por um decréscimo acentuado na tensão de cisalhamento, enquanto que na segunda etapa esse decréscimo é mais lento. Isso pode ser explicado devido aos mecanismos de degradação estrutural da amostra. No primeiro mecanismo ocorre a desintegração da amostra e no segundo mecanismo ocorre a orientação das partículas causadas pela ação da deformação (VIDIGAL, 2009). RAMOS e IBARZ (1998) encontraram comportamento semelhante para suco de laranja concentrado e polpa de marmelo e BRANCO e GASPARETTO (2003) para suco de laranja concentrado.

O efeito da temperatura na caracterização tixotrópica da polpa de manga Ubá pode ser observado nas Figuras 14 e 15, onde o comportamento tixotrópico numa mesma concentração diminui com o aumento da temperatura.

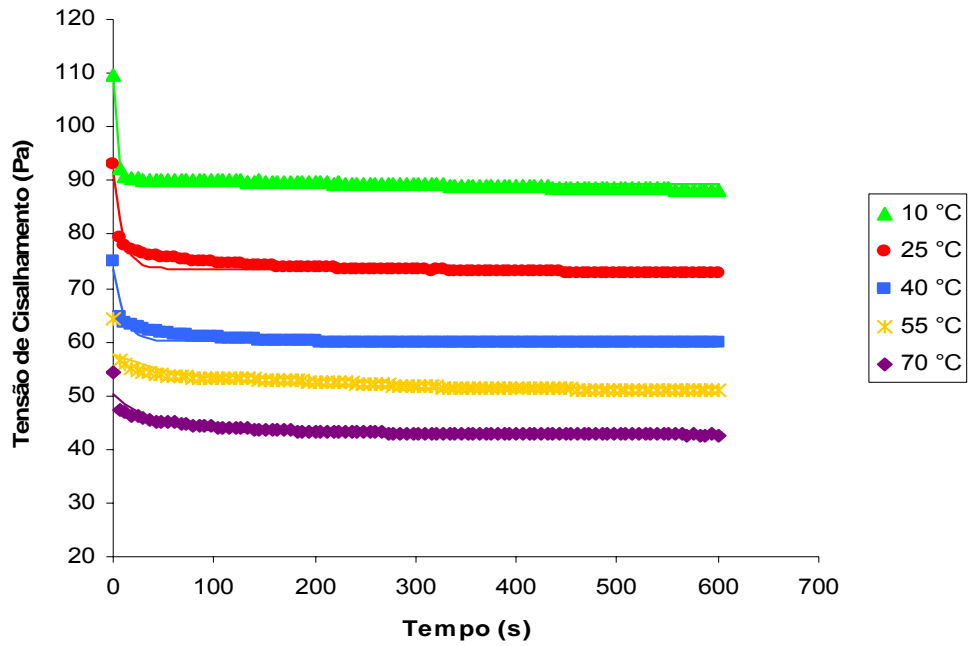


Figura 14- Relação entre tensão de cisalhamento e tempo à taxa de deformação constante de 30 s^{-1} com ajuste pelo modelo de Figoni & Shoemaker para diferentes temperaturas de polpa de manga Ubá com concentração de 25 °Brix.

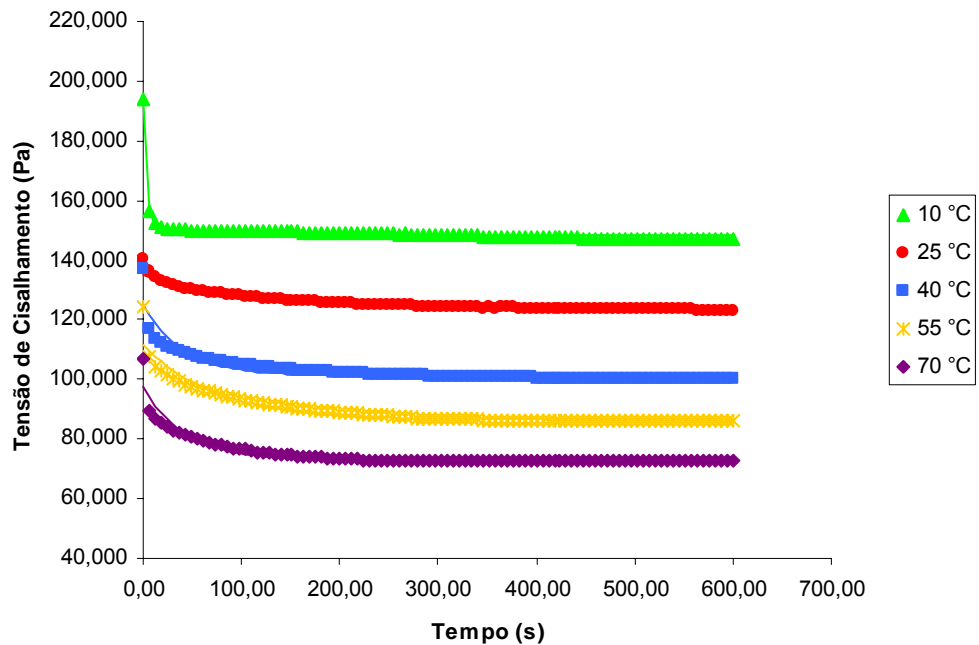


Figura 15- Relação entre tensão de cisalhamento e tempo à taxa de deformação constante de 30 s^{-1} com ajuste pelo modelo de Figoni e Shoemaker para diferentes temperaturas de polpa de manga Ubá com concentração de 30 °Brix.

Para quantificar a tixotropia da polpa de manga Ubá, em uma determinada concentração a distintas temperaturas, os modelos de Figoni e Shoemaker e Weltman foram ajustados aos valores experimentais obtidos.

O modelo de Figoni e Shoemaker (equação 28) apresentou melhor ajuste aos dados experimentais para todas as temperaturas nas concentrações de (25 e 30) °Brix, quando comparado com o modelo de Weltman (equação 26), com valores de R^2 superiores a 0,853 (Tabela 5). Comportamentos similares foram encontrados por BASU et al. (2007) durante a caracterização geléia de abacaxi, e LOZANO e IBARZ (1994) para polpas de frutas concentradas. Os parâmetros obtidos para o modelo de Figoni e Shoemaker foram significativos ($p < 0,0001$).

Tabela 6 - Valores médios para os parâmetros segundo modelo de Figoni e Shoemaker para a polpa de manga Ubá nas concentrações de (25 e 30) °Brix.

C (°Brix)	T (°C)	τ_{oi} (Pa)	τ_e (Pa)	$\tau_{oi} - \tau_e$ (Pa)	K_i (s ⁻¹)	R^2
	10	109,84 ± 0,60	89,28 ± 0,06	20,55 ± 0,54	0,29 ± 0,03	0,922
	25	91,51 ± 0,94	73,62 ± 0,10	17,88 ± 0,05	0,11 ± 0,01	0,816
25	40	73,69 ± 0,62	60,10 ± 0,07	13,59 ± 0,55	0,10 ± 0,01	0,859
	55	57,63 ± 0,43	51,38 ± 0,12	6,25 ± 0,31	0,01 ± 0,00	0,853
	70	50,17 ± 0,39	42,98 ± 0,07	7,18 ± 0,32	0,02 ± 0,00	0,837
	10	194,19 ± 1,18	148,41 ± 0,12	45,78 ± 1,06	0,26 ± 0,02	0,940
	25	135,11 ± 0,44	123,44 ± 0,17	11,67 ± 0,27	0,01 ± 0,00	0,903
30	40	125,29 ± 1,25	101,20 ± 0,21	24,09 ± 1,04	0,03 ± 0,00	0,852
	55	111,51 ± 0,89	86,42 ± 0,22	25,09 ± 0,64	0,01 ± 0,00	0,937
	70	97,38 ± 0,91	73,07 ± 0,16	24,31 ± 0,75	0,02 ± 0,00	0,927

τ_{oi} : Tensão inicial, τ_e : Tensão de equilíbrio, $\tau_{oi} - \tau_e$: Quantidade de estrutura degradada durante o cisalhamento, K_i : Constante cinética de degradação estrutural

Para as concentrações de polpa de manga Ubá estudadas, observa-se que a diferença entre $(\tau_{0i} - \tau_e)$, que representa a quantidade de estrutura degradada durante o cisalhamento, aumenta com a quantidade de sólidos solúveis presentes nas amostras.

O valor de K_i , velocidade de degradação estrutural, diminui com o aumento da concentração de sólidos solúveis presentes nas amostras, nas temperaturas estudadas. Isto sugere que a amostra com menor concentração atinge mais rapidamente o equilíbrio, uma vez que a velocidade com que sua estrutura é destruída é maior.

5.3.2- Comportamento reológico do escoamento

De acordo com os resultados obtidos do estudo tixotrópico neste estudo, para que fosse eliminada a influência da tixotropia no comportamento reológico da polpa de Manga Ubá, todas as amostras sofreram cisalhamento durante um período de 180 s, a uma taxa de deformação de 100 s^{-1} . Para descrever o comportamento reológico da polpa de Manga Ubá nas temperaturas de (10, 25, 40, 55 e 70) °C e nas concentrações de (10, 15, 20, 25 e 30) °Brix foram realizados 25 experimentos com três repetições em duplicata. Posteriormente, as médias das leituras obtidas no reômetro rotacional foram calculadas.

Nas Figuras de 16 a 20, em que a tensão de cisalhamento obtida experimentalmente em função da taxa de deformação aplicada para as amostras de polpa de manga Ubá nas concentrações (10, 15, 20, 25 e 30) °Brix e nas temperaturas (10, 25, 40, 55 e 70) °C, estão apresentados reogramas típicos de um fluido pseudoplástico com tensão crítica (τ_0), que diz que, para que o fluido escoar, é necessário aplicar uma tensão de cisalhamento maior que a tensão inicial.

Dentre os modelos de Herschel-Bulkley e Casson utilizados para descrever o comportamento reológico de polpa de manga Ubá, o modelo de Herschel-Bulkley (equação 21) foi o que proporcionou os melhores parâmetros estatísticos para os ajustes dos dados experimentais, obtendo assim os valores

dos parâmetros para a tensão crítica (τ_0), o índice de consistência (K_H) e o índice de escoamento do comportamento (n_H), para todas as amostras. Apresentou os maiores valores de coeficiente de determinação (R^2) sendo todos superiores a 0,999 e os menores valores de quadrado médio do erro (QME).

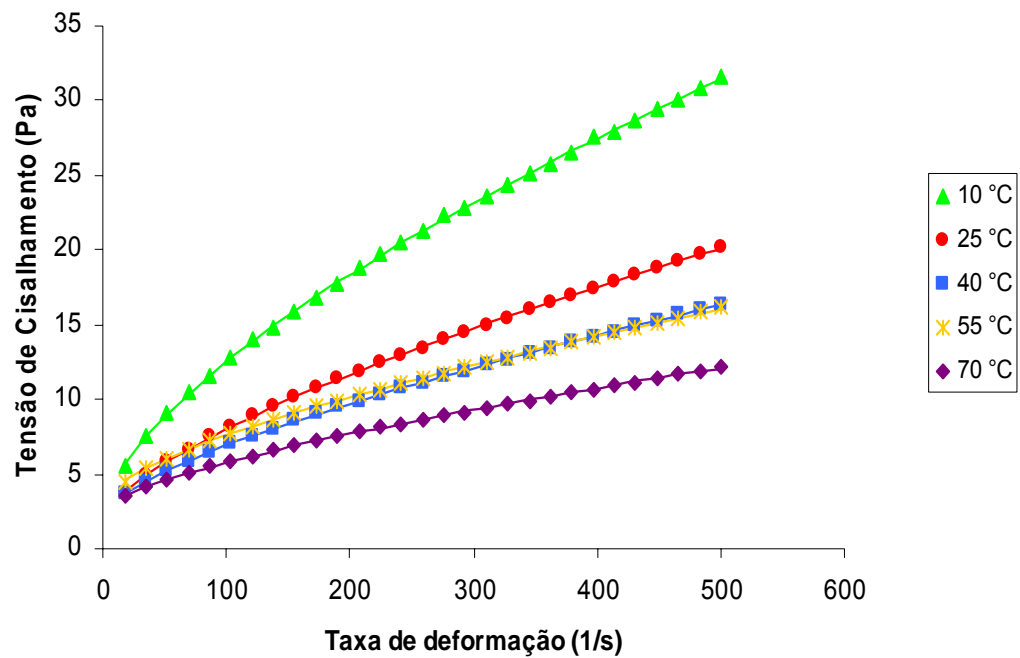


Figura 16- Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de manga Ubá a 10 °Brix em diferentes temperaturas.

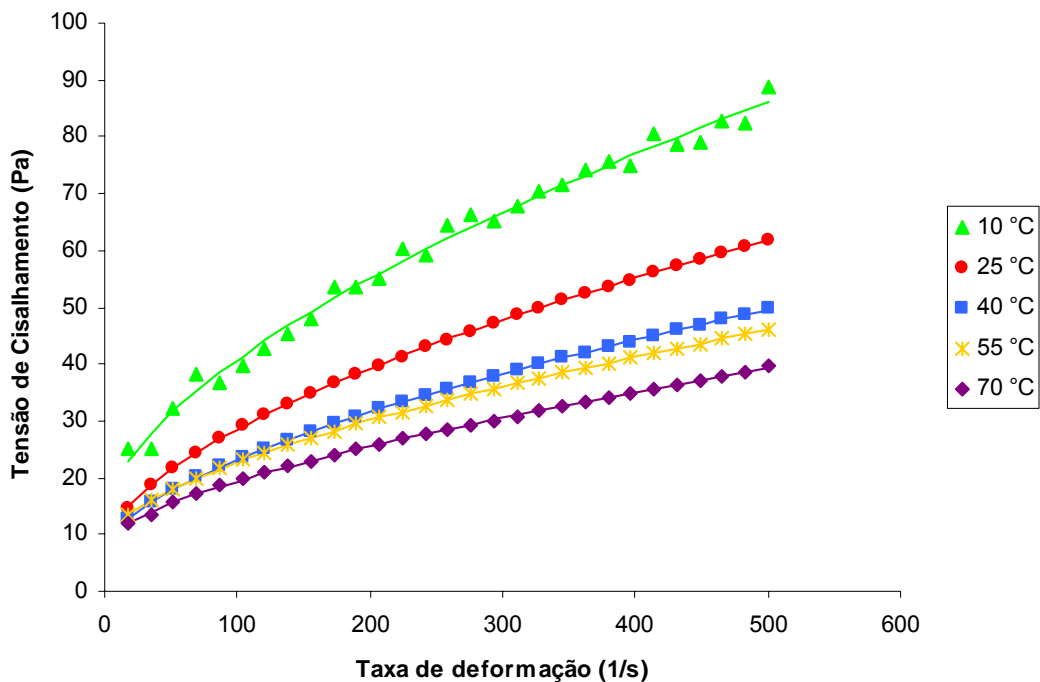


Figura 17- Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de manga Ubá a 15 °Brix em diferentes temperaturas.

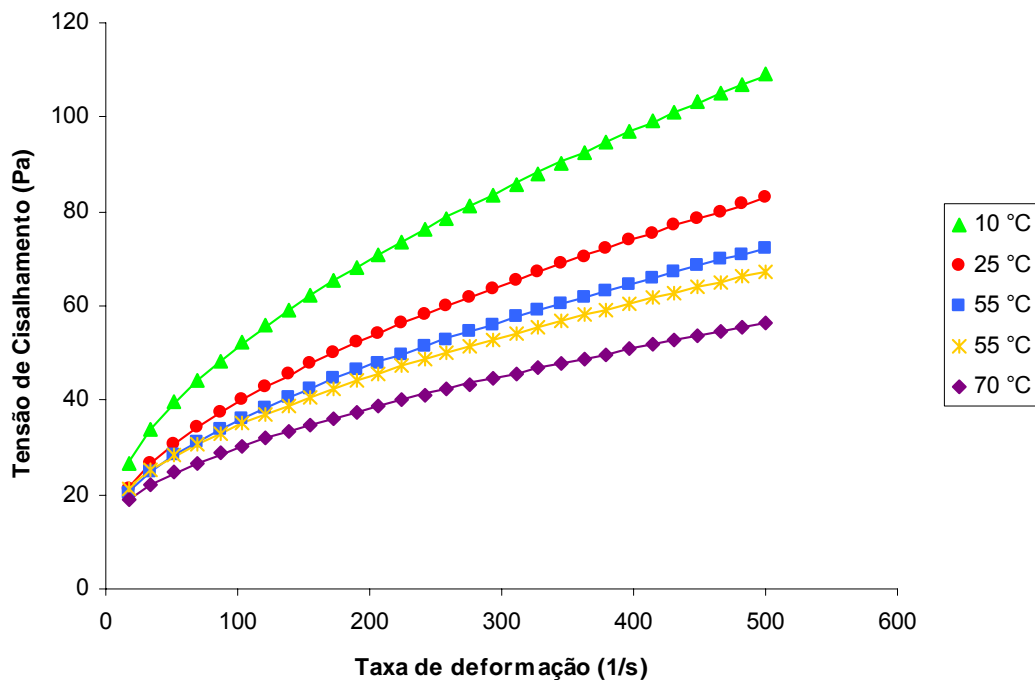


Figura 18- Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de manga Ubá a 20 °Brix em diferentes temperaturas.

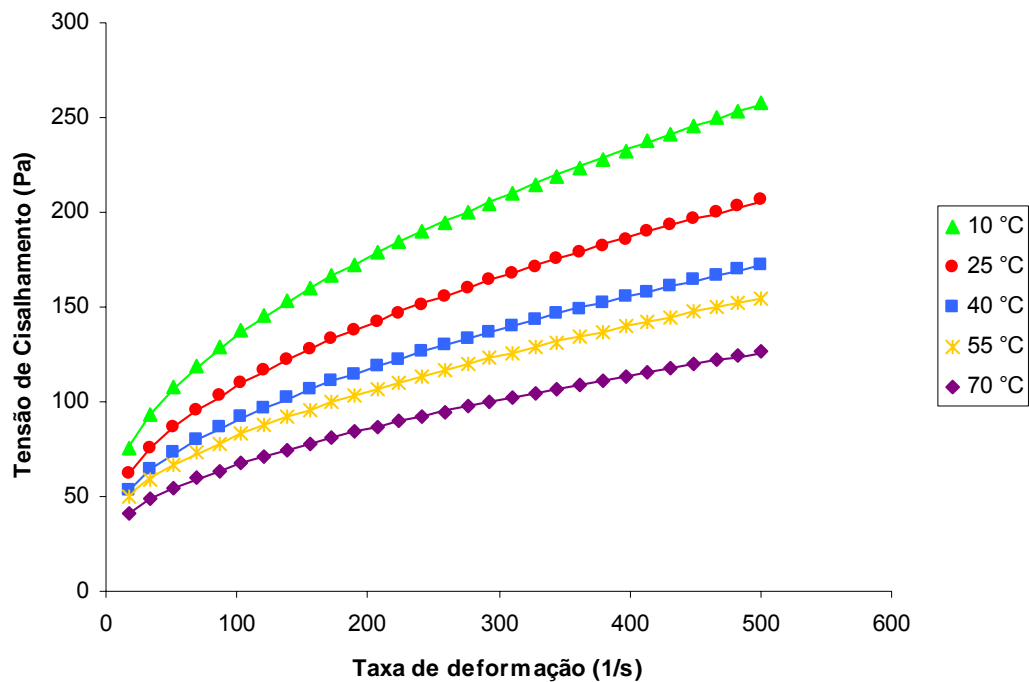


Figura 19- Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de manga Ubá a 25 °Brix em diferentes temperaturas.

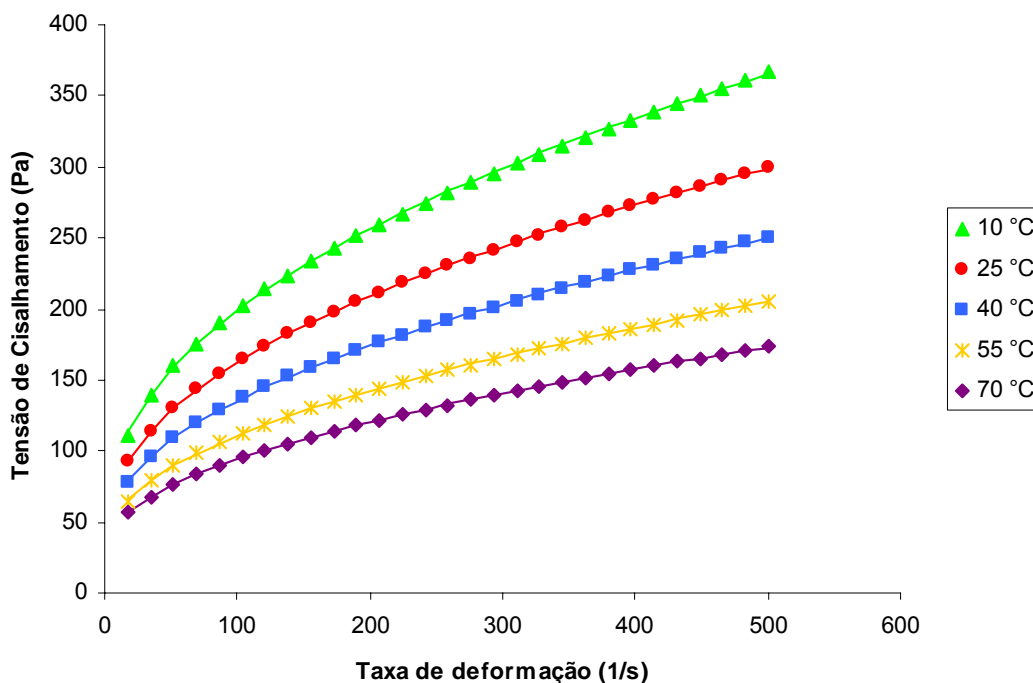


Figura 20- Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de manga Ubá a 30 °Brix em diferentes temperaturas.

Observou-se nas figuras que para uma taxa de deformação fixa, a tensão de cisalhamento diminuiu quando há um aumento de temperatura. O decréscimo da tensão de cisalhamento com o aumento da temperatura pode ser explicado pela ruptura na estrutura da polpa devido à força aplicada e o aumento do alinhamento das moléculas constituintes (RAO, 1999). Também nota-se que, à medida que se aumenta a concentração de sólidos solúveis na polpa, as curvas vão se distanciando cada vez mais da linearidade, ou seja, a polpa vai se tornando cada vez mais pseudoplástica, à medida que se concentra o produto.

De acordo com a Tabela 7, a polpa de manga Ubá exibiu um comportamento pseudoplástico, devido os valores do índice de comportamento do escoamento (n) serem menores que 1 ($n < 1$) para todas as temperaturas. Os parâmetros obtidos para o modelo de Herschel-Bulkley foram significativos ($p < 0,0001$).

Também observou que, o índice de comportamento n_H aumentou ligeiramente com o aumento da temperatura e da fração de água. ADORNO (1997) e GRATÃO (2006) obtiveram comportamento análogo para a polpa de maracujá amarelo em distintas concentrações e temperaturas, caracterizando assim um fluido não-newtoniano e o modelo de Herschel-bulkley foi adequado. Os resultados para o índice de consistência K_H , indica que estes diminuem com o aumento da temperatura e se eleva com o aumento da concentração. RAMOS (1997) observou comportamento semelhante na caracterização reológica de polpa de marmelo com as concentrações variando entre (12,3 e 28) °Brix. SATO e CUNHA (2009) observaram esse mesmo comportamento para a polpa de Jabuticaba.

Tabela 7- Valores dos parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley ($\tau = \tau_0 + K_H \gamma^{n_H}$) para a polpa de manga Ubá a diferentes temperaturas e concentrações.

T (°C)	10 °C	25 °C	40 °C	55 °C	70°C	
10 °Brix	τ_0 (Pa)	2,39 ± 0,15	2,07 ± 0,08	3,33 ± 0,07	2,37 ± 0,06	2,65 ± 0,06
	K_H (Pa.s ⁿ)	0,50 ± 0,02	0,25 ± 0,01	0,19 ± 0,01	0,18 ± 0,01	0,13 ± 0,01
	n_H	0,65 ± 0,01	0,69 ± 0,00	0,68 ± 0,01	0,70 ± 0,01	0,69 ± 0,01
	QME	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	R ²	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
15 °Brix	τ_0 (Pa)	13,55 ± 2,98	7,05 ± 0,07	7,18 ± 0,07	8,60 ± 0,07	8,72 ± 0,23
	K_H (Pa.s ⁿ)	1,64 ± 0,54	1,49 ± 0,01	0,99 ± 0,01	0,87 ± 0,01	0,53 ± 0,04
	n_H	0,61 ± 0,05	0,58 ± 0,00	0,60 ± 0,00	0,60 ± 0,00	0,65 ± 0,01
	QME	3,15	0,00	0,00	0,00	0,03
	R ²	0,991	1,000	1,000	1,000	0,999
20 °Brix	τ_0 (Pa)	13,03 ± 0,33	11,48 ± 0,23	12,15 ± 0,22	14,20 ± 0,14	13,01 ± 0,20
	K_H (Pa.s ⁿ)	2,76 ± 0,07	1,93 ± 0,05	1,61 ± 0,04	1,35 ± 0,03	1,15 ± 0,04
	n_H	0,57 ± 0,00	0,58 ± 0,00	0,58 ± 0,00	0,59 ± 0,00	0,58 ± 0,00
	QME	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
	R ²	0,999	0,999	0,999	1,000	0,999
25 °Brix	τ_0 (Pa)	32,37 ± 1,36	30,48 ± 0,86	29,51 ± 0,71	31,28 ± 0,37	26,35 ± 0,44
	K_H (Pa.s ⁿ)	10,93 ± 0,41	7,61 ± 0,24	5,34 ± 0,18	3,99 ± 0,09	3,08 ± 0,10
	n_H	0,49 ± 0,01	0,50 ± 0,00	0,53 ± 0,01	0,55 ± 0,00	0,56 ± 0,00
	QME	0,32	0,14	0,11	0,04	0,05
	R ²	0,999	0,999	0,999	1,000	0,999
30 °Brix	τ_0 (Pa)	42,11 ± 2,20	37,15 ± 1,27	36,04 ± 1,11	32,37 ± 0,93	31,57 ± 0,80
	K_H (Pa.s ⁿ)	19,92 ± 0,76	15,12 ± 0,42	11,08 ± 0,34	8,32 ± 0,28	6,05 ± 0,22
	n_H	0,45 ± 0,01	0,46 ± 0,00	0,48 ± 0,00	0,49 ± 0,01	0,51 ± 0,01
	QME	0,63	0,23	0,19	0,15	0,13
	R ²	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999

O modelo de Herschel-Bulkley vem sendo usado por diversos autores para o ajuste de dados de polpas e sucos de frutas que caracterize um fluido pseudoplástico. BHATTACHARYA e RASTOGI (1998) para polpa de manga; CHIN et al. (2009) para sucos de pomelo concentrado; MACEIRAS et al. (2006) para purês de frutas; PEREIRA et al. (2003) para polpa de açaí; SUGAI et al. (2004) para purê de manga variedade Haden; RAMOS (1997) para polpa de marmelo; TELIS-ROMERO et al. (1999) e SÁENZ e COSTELL (1986) observaram comportamento semelhantes na caracterização reológica para suco de laranja e limão, respectivamente, os quais foram descritos pelo modelo de Herschel-Bulkley.

5.3.2.1- Efeito da temperatura

Para o efeito da temperatura foram considerados os seguintes parâmetros reológicos: tensão inicial (τ_0), índice de consistência (K_H) e o índice de comportamento do escoamento (n_H), que se encontram na Tabela 7. A viscosidade aparente (equação 22) da polpa de manga Ubá nas distintas concentrações e temperaturas foi calculada de acordo com os parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley, que foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais.

A taxa de deformação adotada para os cálculos foi de 100 s^{-1} . Esse valor da taxa de deformação também foi utilizado por SILVA et al. (2005), para estudar o efeito da temperatura no comportamento reológico de suco de acerola. NINDO et al. (2007), trabalhando com purê de mirtilo também adotou esse mesmo valor de taxa de deformação.

O efeito da temperatura foi descrito de forma satisfatória por uma equação tipo de Arrhenius (Equação 29). A equação de Arrhenius tem sido usada de forma satisfatória para prever a dependência da temperatura de fluidos alimentícios ricos em açúcares e sucos de frutas (KHALIL et al., 1989). As constantes (η_0 e E_a) a partir da equação de Arrhenius obtidas a partir dos parâmetros reológicos do modelo de Herschel-Bulkley são apresentados na Tabela 8, juntamente com os valores de coeficiente de determinação (R^2), que

indica que os ajustes foram satisfatórios. Os valores expressos foram significativos ($p < 0,0001$).

Tabela 8 - Valores dos parâmetros do modelo de Arrhenius que relaciona o efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente para a polpa de Manga Ubá.

C (°Brix)	$\eta_{\infty} \cdot 10^3$ (Pa.s)	E_a (kJ/mol)	R^2
10	1,41 ± 0,02	10,41	0,854
15	4,61 ± 0,00	10,44	0,908
20	25,45 ± 0,01	6,97	0,906
25	27,29 ± 0,01	9,16	0,990
30	28,69 ± 0,00	9,99	0,999

A equação de Arrhenius indica a tendência de diminuição da viscosidade aparente com o aumento da temperatura, como pode ser observado na Figura 21. A ordem de grandeza da energia de ativação indica a dependência da viscosidade com a temperatura, sendo que o aumento da temperatura provoca um efeito de diminuição da viscosidade.

Na Tabela 8 observa-se a partir dos valores de coeficiente de determinação (R^2) que o pior ajuste da equação de Arrhenius foi para a polpa de manga Ubá a 10 °Brix. Observa-se também que os valores de η_{∞} aumentaram com a elevação da concentração. Porém E_a se manteve praticamente constante em quase todas as concentrações, decrescendo ligeiramente com o aumento da concentração, exceto na amostra de polpa de manga Ubá a 20 °Brix que teve um decréscimo acentuado comparado às outras concentrações de sólidos solúveis. Essa redução no valor da energia de ativação com o aumento da concentração de sólidos solúveis também foi observada em suco de manga por DAK et. al (2007) e em suco de acerola por SILVA et. al (2005). GRATÃO (2006) ao estudar suco de maracujá a diversas concentrações encontrou valores constantes para a E_a e o η_{∞} aumentou ligeiramente com o aumento da temperatura. HAMINIUK (2005) comparou a polpa integral de araçá com 11,4 °Brix com polpa integral de amora-preta com

5,37 °Brix e observou que quanto menor o valor de sólidos solúveis, maior foi o valor de E_a da polpa. IBARZ e LOZANO (1992) encontraram para polpa de pêsego a 34,2 °Brix uma E_a de 10,5 kJ/mol ao estudar a influência da temperatura no comportamento reológico do mesmo.

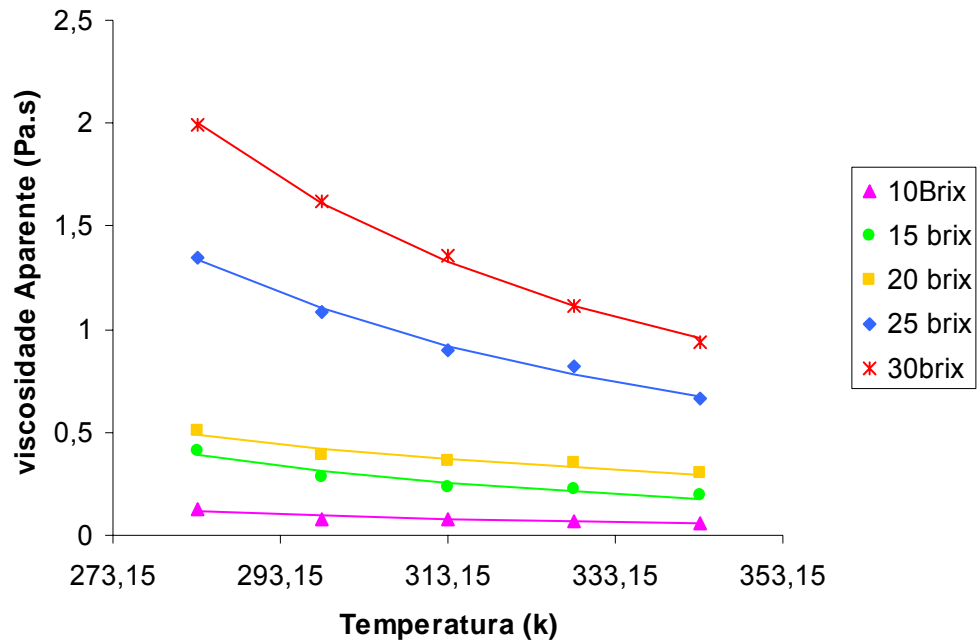


Figura 21- Efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente da polpa de manga Ubá a diferentes concentrações de sólidos solúveis.

Na Figura 21 pode se observar que a viscosidade aparente decresce com o aumento da temperatura. Também é possível observar grandes variações nas curvas à medida que se aumenta a concentração.

5.3.2.2- Efeito da concentração

O efeito da concentração no comportamento de polpas e sucos de frutas pode ser descrito por equações do tipo potencial ($\eta_a = K_1 \cdot (C)^{A_1}$) e exponencial ($\eta_a = K_2 \cdot \exp(A_2 \cdot C)$).

Para estimar os parâmetros das equações citadas, os modelos foram ajustados aos dados experimentais em todas as temperaturas estudadas. O modelo potencial se ajustou melhor aos dados experimentais, apresentando coeficiente de determinação mais elevado. Assim nesse trabalho se apresenta

somente os ajustes feitos para o modelo potencial. Esses resultados se assemelham aos encontrados por SILVA et al. (2005) para o suco de acerola. VITALI et al. (1974) também descreveram o efeito da concentração de sólidos solúveis sobre a viscosidade aparente por meio de uma função potência e seus resultados indicaram que o expoente da função potência era dependente da temperatura e da taxa de deformação na qual a viscosidade aparente foi determinada. GRATÃO (2006), estudando o efeito da concentração de sólidos solúveis do suco de maracujá descreveu satisfatoriamente seus dados através de um modelo potencial.

Os valores dos parâmetros K_1 e A_1 e os respectivos coeficientes de determinação obtidos com o ajuste para o modelo potencial são apresentados na Tabela 9. Os parâmetros foram significativos ($p < 0,0001$).

Tabela 9 - Parâmetros estimados para o modelo potencial aplicados aos dados de viscosidade aparente de polpa de manga Ubá em função da concentração.

T (°C)	K_1 .10 ⁴ (Pa.s)	A_1 (°Brix)	R ²
10	2,28 ± 0,00	2,67 ± 0,35	0,972
25	1,07 ± 0,00	2,83 ± 0,35	0,976
40	1,08 ± 0,00	2,78 ± 0,29	0,982
55	2,98 ± 0,00	2,43 ± 0,30	0,973
70	2,27 ± 0,00	2,45 ± 0,24	0,983

SARAVACOS (1970) observou que a viscosidade dos purês ou polpas de frutas depende da concentração, do tamanho e do formato dos sólidos suspensos. PELEGRINE (1999) obteve conclusões semelhantes para polpa de manga.

5.3.2.3- Efeito combinado da temperatura e da concentração

Na realidade, para projetos de engenharia, como o dimensionamento de equipamentos, é extremamente útil obter uma única e simples relação para

descrever o efeito combinado entre temperatura e concentração. Assim, ajustaram-se duas equações (33 e 34) aos dados experimentais em função da concentração e da temperatura. Essas equações já foram usadas por diversos autores quando combinado o efeito da temperatura e da concentração para derivados de frutas (VITALI et al. (1974); ADORNO (1997); IBARZ et al. (1995); RAO (1984)).

Feito o ajuste das equações preditas na literatura, os dados experimentais foram obtidas as seguintes equações para o cálculo da viscosidade aparente quando se combina o efeito da temperatura e da concentração para a polpa de manga Ubá nas concentrações variando entre 10 a 30 °Brix e na faixa de temperatura variando entre 10 à 70 °C. Os valores obtidos foram significativos ($p < 0,0001$).

$$\eta_a = 3,81 \times 10^{-6} C^{2,68} \cdot \exp\left(\frac{1155}{T}\right) \quad R^2=0,980 \quad (37)$$

$$\eta_a = 1,12 \times 10^{-3} \cdot \exp\left(0,114C + \frac{1157}{T}\right) \quad R^2=0,970 \quad (38)$$

Onde η_a é a viscosidade aparente (Pa.s), C é a concentração de sólidos solúveis da polpa de manga Ubá (°Brix) e T é a temperatura absoluta (k).

As equações apresentaram coeficientes de determinação elevados. O segundo modelo matemático é definido por diversos autores, entre eles, IBARZ et al. (1995), SARAVACOS (1970), KHALIL (1979) como um dos melhores modelos para se explicar o efeito combinado entre temperatura e concentração sobre o índice de consistência de derivados de frutas. RAMOS (1997) ajustou esses mesmos modelos aos seus dados experimentais de polpa de marmelo.

6. CONCLUSÕES

De acordo com as discussões dos resultados deste trabalho, é possível obter as seguintes conclusões:

1- Foi possível verificar que existe uma relação linear da massa específica com a temperatura e uma relação potencial com a concentração de sólidos solúveis. Sendo assim, a massa específica da polpa de manga Ubá em função da temperatura e da concentração pode ser descrita pela seguinte equação:

$$\rho = 1034,95 - 0,4570T + 0,3340C + 0,0740C^2 \quad R^2=0,933$$

em que: ρ é a massa específica em (kg.m⁻³); T é a temperatura (°C); C é a concentração em sólidos solúveis (°Brix).

2- Foi constatado que a difusividade térmica tem uma tendência de diminuir com o aumento da concentração e aumentar quando se eleva a temperatura. Foi proposta uma equação para o cálculo da difusividade quando combinado temperatura e concentração:

$$\alpha = 0,12065 \times 10^{-6} - 0,1082 \times 10^{-8}C - 0,2181 \times 10^{-9}T + 0,1323 \times 10^{-10}T^2 \quad R^2=0,944$$

Em que: α é a difusividade térmica (m².s⁻¹); C é a concentração (°Brix) e T é a temperatura (°C).

3- A polpa de manga Ubá apresentou comportamento tixotrópico somente nas concentrações de (25 e 30) °Brix em toda a faixa de temperatura estudada. O modelo de Figoni e Shoemaker, foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais apresentando coeficientes de determinação superiores a 0,853.

4- A polpa de manga Ubá apresentou um comportamento de um fluido de Herschel-Bulkley, ou seja, um fluido pseudoplástico com tensão crítica. O modelo de Herschel-Bulkley ajustou-se satisfatoriamente aos dados experimentais da polpa de manga Ubá nas faixas de 10 a 30 °Brix e 10 a 70 °C, apresentando coeficientes de determinação superiores a 0,999.

5- A equação de Arrhenius descreveu de forma satisfatória o efeito da temperatura para a polpa de manga Ubá, indicando a tendência de diminuição da viscosidade aparente com o aumento da temperatura.

6- Duas equações descreveram de forma satisfatória o efeito combinado da temperatura com a concentração, permitindo dessa maneira calcular a viscosidade aparente da polpa de manga Ubá:

$$\eta_a = 3,81 \times 10^{-6} C^{2,68} \cdot \exp\left(\frac{1155}{T}\right) \quad R^2=0,980$$

$$\eta_a = 1,12 \times 10^{-3} \cdot \exp\left(0,114C + \frac{1157}{T}\right) \quad R^2=0,970$$

Onde η_a é a viscosidade aparente (Pa.s), C é a concentração da polpa de manga Ubá (°Brix) e T é a temperatura absoluta (K). Para os cálculos de engenharia, é de grande utilidade propor uma equação em que o efeito da concentração e da temperatura seja combinado.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-JDAYIL, B. Modelling the time-dependent rheological behaviour of semisolid foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, v. 57, p. 97–102, 2003.

ADORNO, R. A. C. **Reologia de sucos de frutas tropicais**. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas-SP, 1997.

ALONSO, A. L.; LARRODÉ, O.; ZAPICO, J. Rheological behaviour of infant foods. **J. Texture Studies**, 26, 193-202, 1995.

ALVARADO, J. D.; ROMERO, C. H. Physical properties of fruits: density and viscosity of juices, as functions of soluble solids and content and temperature. **Latin American Applied Research**, v.19, n.15, p. 15-1, 1989.

Anuário Brasileiro da Fruticultura. REETZ, E. R. et al.[...] Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2007.

ARAÚJO, J. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIREDO, R. M. F. Massa específica de polpa de cupuaçu (*theobroma grandiflorum* Schum.) sob diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 4, n. 2, 127-134, 2002.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of AOAC international**. In Fruits juices. 16th edition, vol. 2, Maryland. AOAC International, 1997. p 37.1-23

BAHATTACHARYA, S.; RASTOGI, N. K. Rheological properties of enzyme-treated mango pulp. **Journal of Food Engineering**, v.36, 249-262, 1998.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; IBARZ, A.; PELEG, M. Propriedades reológicas de alimentos fluidos. **Alimentaria**, abril, 39-69, 1993.

BASU, S.; SHIVHARE, U.S.; RAGHAVAN, G.S.V. Time Dependent Rheological Characteristics of Pineapple Jam. **International Journal of Food Engineering**, v. 3, issue 3, 2007.

BENEVIDES, S. D. Melhoria da qualidade e análise de conjuntura de certificação da manga e polpa de manga Ubá na Zona da Mata Mineira. Tese de Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos .Viçosa: UFV, 2006.

BENEVIDES, S. D.; RAMOS, A. M.; STRINGHETA, P. C.; CASTRO, V. C. Qualidade da manga e polpa da manga Ubá. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Campinas, 28 (3), 571-578, 2008.

BRANCO, G. I.; GASPARETTO, C. A. Análise quantitativa da tixotropia do suco de laranja concentrado congelado. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v.3, n. 2, 195-200, 2001.

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. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, 23, 166-171, dez. 2003.

BRASIL. Instrução Normativa nº 01 de 07 de janeiro de 2000. Aprova o Regulamento Técnico Geral para fixação dos Padrões de Identidade e Qualidade para Polpa de Fruta. **Diário Oficial da União**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), 2000.

BROOKFIELD ENGINEERING LABORATORIES. **More Solutions to Sticky Problems**, 1994.

BROWMIK, S.R., HAYAKAWA. A new method for determining the apparent thermal diffusivity of thermally conductive food. **Food Technol.**, 44(2):469-474, 1979.

CEPEDA, E.; VILLÁRAN, M. C. Density and viscosity of *Malus Floribunda* juice as a function of concentration and temperature. **Journal of Food Engineering**, v. 41, 103-107, 1999.

CHIN, N. L.; CHAN, S. M.; CHUAH, T. G.; TALIB, R. A. Modelling of rheological behaviour of pummelo juice concentrates using master-curve. **Journal of Food Engineering**, v.93, n.2, 134-139, 2009.

COSTA, L.T. **Características físicas e físico-químicas do óleo de duas cultivares de mamona**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 2006, 112p.

CRANDALL, P.G.; CHEN, C. S.; CARTER, R. D. Models for predicting viscosity of orange juice concentrate. **Food Technology**, maio, 245-252, 1982.

DAK, M.; VERMA, R.C.; JAAFFREY, S.N.A. Effect of temperature and concentration on rheological properties of “Kesar” mango juice. **Journal of Food Engineering**, v.80, 1011-1015, 2007.

DANTAS JÚNIOR, E. E.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIREDO, R. M. F. Determinação e elaboração de modelos de predição da massa específica da manga espada. **Revista Educação Agrícola Superior**. V.22, n.1, 39-42, 2007.

DICKERSON, R. W. Na apparatus for measurement of thermal diffusivity of foods. **Food Technology**, v.19, n 5, 198-204, 1965.

DUARTE A. S. R; OLIVEIRA P. J. Estudo de escoamentos viscoelásticos simples em regime variável: análise detalhada de um “escoamento de arranque”. **Conferência nacional de métodos numéricos em mecânica dos fluidos e termodinâmica**. Portugal, 2006.

DUVAL, M.F.; BUNEL J.; SITBON, C.; RISTERUCCI, A.M. Development of microsatellite markers for mango (*Mangifera indica* L.). **Molecular Ecology Notes**, Oxford, v. 5, p. 824-826. 2005.

EVANGELISTA, R. M.; VIEITES R. L. Avaliação da qualidade de polpa de goiaba congelada, comercializada na cidade de São Paulo. **Segurança Alimentar e Nutricional**, Campinas, 13(2): 76-81, 2006.

FARAONI, A. S. **Efeito do tratamento térmico, do congelamento e da embalagem sobre o armazenamento da polpa de manga orgânica (*Mangifera indica* L) cv. "Ubá"**. Viçosa: Tese de Mestrado em Tecnologia de Alimentos/UFV, 2006.

FERREIRA, G. M.; QUEIROZ, A. J. M.; CONCEIÇÃO R. S.; GASPARETTO C. A. Efeito da temperatura no comportamento reológico das polpas de caju e goiaba. **Revista Ciências Exatas e Naturais**. Vol. 4, n 2, Jul/Dez 2002.

FIGONI, P.I.; SHOEMAKER, C.F. Characterization of structure breakdown of foods from their flow properties. **Journal of Texture Studies**, v. 12, p. 287-305, 1981.

FIGONI, P.I.; SHOEMAKER, C.F. Characterization of time dependent flow properties on mayonnaise under steady shear. **Journal Texture Studies**, v. 114, p. 431-442, 1983.

GAFFNEY, J.J.; BAIRD, C.D.; ESHLEMAN, W.D. Review and analysis of transient method for determining thermal diffusivity of fruits and vegetables. **Am. Soc. Heat.,Refriger. Condit. Engin. INC-Transactions**, 86:261-280, 1980.

GOMES, J. C. **Análise de Alimentos**. Viçosa-MG. 2007.

GOULD, W.A. **Tomato production: processing & technology**. 3.ed. CTI publications, 1992.

GRATÃO, A. C. A. **Termofluidodinâmica de sucos de frutas pseudoplásticos em dutos cilíndricos e ânnulos concêntricos**. Faculdade de Engenharia de Alimentos Tese de Doutorado, Campinas-SP, 2006.

HAMINIUK, C. W. I; **Comportamento reológico e fracionamento péctico das polpas integrais de araçá (*Psidium cattleianum sabine*) e amora-preta (*Rubus spp*)**. Curitiba: Tese de Mestrado em Tecnologia de Alimentos/UFPR, 2005.

HAYES, C. Thermal diffusivity of papaya fruit. **Journal of Food Science**, 49(4):1219-1221, 1984.

IBARZ, A., BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. **Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos**. Technomic. Inc. Pennsylvania – USA : 85-204, 1996.

IBARZ, A.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. **Food preservation technology series: Unit operations in food engineering**. Ed: CRC Press Inc, v. 2, p. 89 -139, 2002.

IBARZ, A.; GINER, J.; PAGÁN, J.; GIMENO, V.; GARZA, S. Rheological behaviour of kiwi fruit juice concentrates. **J. Texture Studies**, v.26, 137-145, 1995.

IBARZ, A.; LOZANO, J. E. Caracterización reológica de pulpas concentradas de ciruela e melocotón. **Revista Esp. Cien. Tecn. Alimentos**. V. 32, 85-89, 1992.

IBARZ, A.; SINTES, J. Rheology of egg yolk. **J. Texture Studies**. V.20, 161-167, 1989.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Produção agrícola municipal. Acessado em: 04/02/2009. <http://www.sidra.ibge.gov.br>

JIMÉNEZ, L. FERRER, J. L.; GARCIA, I. Modelos reológicos para líquidos alimentarios. **Alimentación, Equipos y Tecnología**. Janeiro/fevereiro, 295-299, 1987.

KHALI, K. E.; RAMAKRISHANA, P.; NANJUNDASWAMY, A. M.; PAHVARDHAN, M. V. Rheological behaviour of clarified banana juice: effect of temperature and concentration. **Journal of Food Engineering**, v.10, 231-240, 1989.

LEONARDI, G.R.; MAIA CAMPOS, P.M.B.G. Estabilidade de formulações cosméticas. **International Journal of Pharmaceutical Compounding**, v. 3, n.4, p. 154-156, 2001.

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

LOZANO, J. E.; IBARZ, A. Thixotropic behaviour of concentrated fruit pulps. **LWT**, v.27, n.1, 16-18, 1994.

MACEIRAS, R.; ÁLVAREZ, E.; CANCELA, M. A. Rheological properties of fruits purees: Effect of cooking. **Journal of Food Engineering**, v.80, 763-769, 2007.

Manga Ubá. **Manga Ubá**. Disponível em: <http://www.mangaubá.com.br> Acesso: 13-04-2009.

MARTENS, T. **Mathematical modelo of heat processing in flat containers**. Doctoral Thesis, Katholeike University, Leunen, 1980.

MASKAN, M.; GOGUS, F. Effect of sugar on the rheological properties of sunflower oil-water emulsion. **Journal of Food Engineering**, v. 43, p. 173-177, 2000.

MATTOS, J. S. de. **Banco de dados de propriedades termofísicas de produtos hortícolas**. Dissertação de mestrado. Fac. de Engenharia Agrícola, Campinas, 2007.

MIZRAHI, S.; BERK, Z. Flow behaviour of concentrated Orange juice: Mathematical treatment. **J. Text. Studies**. V. 3, 69-79.

MUNIZ, M. B.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIREDO, R. M. F.; DUARTE, M. E. M. Caracterização termofísica de polpas de bacuri. **Ciênc. Tecn. Alimentos**. Campinas, v.26, n. 2, 360-368, 2006.

NINDO, C.I.; TANG, J.R.; TAKHAR, P.S. Rheological properties of blueberry puree for processing applications. **LWT**, v 40 (2007) 292-299.

PAGÁN, J.; IBARZ, A. Extraction and rheological properties of pectin from fresh peach pomace. **Journal of Food Engineering**, v. 39, p. 193-201, 1999.

PASQUEL, A. Gomas: utilização e aspectos reológicos. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Campinas. v. 33, 1999, p. 86-97.

PELEGRINE, D. H.; VIDAL, J. R. M. B.; GASPARETTO, C. A. Estudo da viscosidade aparente das polpas de manga (Keitt) e abacaxi (Pérola). **Ciênc. Tecnol. Alimentos**, v.20 n.1 Campinas, 2000.

PELEGRINE, D.H. **Comportamento reológico das polpas de manga e abacaxi**. Campinas: Tese de Mestrado em Tecnologia de Alimentos/ UNICAMP, 1999, 115p.

PEREIRA, E. A.; QUEIROZ, A. J. de M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. de. Propriedades reológicas da polpa de açaí (*Euterpe oleracea*, Mart.): efeito da concentração. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.23, n.3, p.606-612, set./dez. 2003.

POSSA, M. V; LIMA, J. R. B. de. **Comportamento reológico de polpas de minério**, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 37 p. 2000.

QUEIROZ, A. J. M.; VIDAL, J. R. M. B.; GASPARETTO, C. A. Influência de sólidos solúveis no comportamento reológico do suco de Manga. **Rev. Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande, v.1, n.1, 27-32, 1999.

RAMOS, A. M.; BENEVIDES, S. D.; PEREZ, R.; DIAS, D. F.; REZENDE, P.M. **Manual de rastreabilidade para a cadeia produtiva da manga**. Viçosa: Editora UFV, 2007.

RAMOS, A. M.; **Caracterización reológica y transmisión de calor em derivados de frutas en el interior de tanques agitados**. Universitat de Lleida. Escola Técnica Superior d'Enginyeria Agrària de Lleida. Tesis Doctoral, 1997.

RAMOS, A. M.; COUTO, F. A. d'ARAÚJO; REZENDE, P. M.; LELIS, F. M. V.; BENEVIDES, S. D.; PEREZ, R. **Manga Ubá: Boas Práticas Agrícolas para Produção Destinada à Agroindústria**. Viçosa: Editora UFV, 2005.

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, p.57-63. 1998.

RAO, M. A. **Rheology of fluid and semisolid foods: principles and applications**. New York: Aspen Publishers, 1999.

RAO, M. A.; COOLEY, H. J.; NOGUEIRA, J. N.; McLELLAN, M. R. Rheology of apple sauce: Effect of apple cultivar, firmness, and processing parameters. **J. Food Science**, v.51, n.1, 176-179, 1986.

RAO, M. A.; COOLEY, H. J.; VITALI, A. A. Flow properties of concentrated juices at low temperatures. **Food Technology**, v.38, n.3, 113-119, 1984.

RIEDEL, L. Measurements of thermal diffusivity of foodstuffs in water. **Kältetechnik-klinatisierung**, v.21, n.11, 1969.

ROZANE, D. E.; DAREZZO, R. J.; AGUIAR, R. L.; AGUILERA, G. H. A.; ZAMBOLIM, L. **Manga: Produção integrada, industrialização e comercialização**. Viçosa: UFV, 2004.

SÁENZ, C.; COSTELL, E. Comportamiento reológico de productos de limón. Influencia de la temperatura y de la concentración. **Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos**, v.26, n. 4, p. 581-588, 1986.

SARAVACOS, D. G.; MAROULIS, Z. B. **Transport properties of food**. New York: Marcel Dekker, 63-105, 2001.

SARAVACOS, G. D. Effect of temperature on viscosity of fruit juices and purees. **J. Food Science**, v.5, 12-125, 1970.

SATO, A. C. K; CUNHA, R. L. da; Effect of particle size on rheological properties of jaboricaba pulp. **Journal of Food Engineering**. V. 91, (566-570), 2009.

SCHARAMM, G. **A practical approach to rheology and rheometry**. 2. edição, Karlsruhe, Alemanha, 2000.

SHARMA, S.K., MULVANEY, S.J., RIZVI, S.S.H. **Food processing engineering: theory and laboratory experiments**. United States of America:Wiley-Interscience, 2000, 348p.

SILVA, F. C. da; GUIMARÃES, D. H. P; GASPARETTO C. A; Reologia do suco de acerola: efeitos da concentração e temperatura. **Ciênc. Tecnol. Alimentos**, Campinas, 25(1): 121-126, jan.-mar. 2005.

SILVA, S.B. **Propriedades termofísicas da polpa de abacaxi**. Campinas, 1997. (Master's Thesis in Food Engineering) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.

SIMÕES, M. R.; MURR, F. E. X. Determinação difusividade térmica da polpa de manga. **Acta Scientiarum**, v.22, n.5, 1225-1228, 2000.

STEFFE, J. F. **Rheological methods in food process engineering**. 2. ed. Michigan: Freeman Press, 1992.

SUGAY, A. Y.; TADINI, C. C.; TRIBESS, T. B. Influência da temperatura do tratamento térmico sobre os parâmetros reológicos do purê de manga (*Mangifera indica L.*) variedade Haden. **XVIII Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 2004.

TÁRREGA, A.; DURAN, L.; COSTELL, E. Flow behaviour of semi-solid dairy desserts. Effect of temperature. **International Dairy Journal**, v. 14, p. 345-353, 2004.

TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L. YAMASHITA, F. Thermophysical properties of Brazilian Orange juice affected by temperature and water content. **Journal of Food Engineering**, v.38, n.1, 27-40, 1998.

TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N.; YAMASHITA, F. Friction factors and rheological properties of orange juice. **Journal of Food Engineering**, v.40, n.1 101-106, 1999.

TONELI, J. T. C. L. **Processos de separação física e secagem de inulina obtida a partir de raízes de chicória (*Cichorium intybus L.*)**. Campinas: Tese de Doutorado em Tecnologia de Alimentos/ UNICAMP, 2006.

VANDRESEN, S. **Caracterização físico-química e comportamento reológico de sucos de cenoura e laranja e suas misturas**. Santa Catarina: Tese de Mestrado em Engenharia de Alimentos/ UFSC, 2007.

VIDAL, J. R. M. B.; PELEGRINE, D. H.; GASPARETTO, C. A. Efeito da temperatura no comportamento reológico da polpa de manga (*mangifera indica L-Keitt*). **Ciênc. Tecnol. Alimentos**. Campinas, v.24, 39-42, 2004.

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

VIDAL, J. R. M. B; SIERAKOWSKI, M. R; HAMINIUK, C. W. I; MASSON, M. L. Propriedades reológicas da polpa de manga (*Mangifera indica L. cv. Keitt*) centrifugada. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 30, n. 5, p. 955-960, set./out., 2006.

VIDIGAL, M. C. T. R. **Caracterização reológica e sensorial de sobremesa láctea diet contendo concentrado protéico de soro**. Dissertação de mestrado. Viçosa, 2009.

VITALI, A. A.; RAO, M. A. Flow properties of low-pulp concentrated orange juice: effect of temperature and concentration. **Journal of Food Science**, v.49, n.3, p.882-88, 1984.

VITALI, A.A.; ROIG, S. M.; RAO, M. A. Viscosity behaviour of concentrated passion fruit. **Confructa**, v. 19, n.5, 201-206, 1974.

WELTMAN, R.N. Breakdown of thixotropic structure as a function of time. **Journal of Applied Physics**, v. 14, p. 343-350, 1943.

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