



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

**Estudo Reológico do suco de manga - Efeito
dos sólidos insolúveis**

JOSÉ RANIERE MAZILE VIDAL BEZERRA
Engenheiro de Alimentos

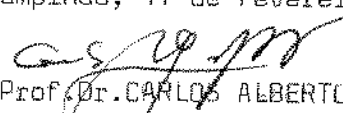
PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por JOSÉ RANIERE MAZILE VIDAL BEZERRA e aprovada pela Comissão Julgadora em 17.02.97.

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO GASPARETTO
Orientador

Campinas, 17 de fevereiro de 1997

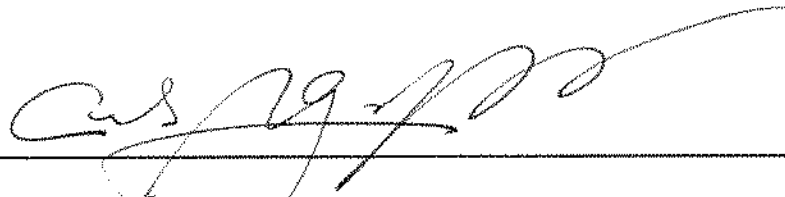
Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos - UNICAMP - para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.


Prof. Dr. CARLOS ALBERTO GASPARETTO

Presidente da Banca

**Campinas
São Paulo - Brasil
Fevereiro / 1997**

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto

(Orientador)



Prof. Dr. José Antônio Gomes Vieira

(Membro)



Profa. Dra. Hilary C. Menezes

(Membro)

Profa. Dra. Florencia Cecilia Menegalli

(Membro)

Campinas, 14 de fevereiro de 1997

DEDICÓ

Aos meus pais que me ensinaram

o amor ao estudo,

ao dever,

a verdade,

a lealdade,

as qualidades de caráter e

a honestidade.

A minha mãe Maria Honorina Vidal Pinheiro, que me acompanhou com tanto carinho e dirigiu-me nos caminhos das realizações. E a Deus por ter me dado os caminhos.

A meus irmãos o Eng. Agrônomo Roberto Cláudio Vidal, o Geógrafo Róbson Ronaldo Vidal, Paulo Vidal, Márcia Regina Vidal, Gláucia Cristina Vidal e a minha prima Maria do Socorro Vidal (in memorium).

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Engenharia de Alimentos pela oportunidade de realização deste trabalho.

À CAPES, pela bolsa concedida durante a realização do curso de Mestrado.

Quero, nesta oportunidade, agradecer toda a atenção que o Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto teve para comigo. Pela orientação, amizade, experiência compartilhada e aos momentos de descontração.

Ao amigo Jaime Vilela de Resende, pela importante colaboração no desenho dos diagramas apresentados neste trabalho.

Ao amigo Alexandre Queiroz pelas valiosas sugestões durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Pompeu, do Departamento de Eng. de Petróleo, pela colaboração no desenvolvimento da parte experimental.

À Catarina Parente, pela amizade sincera, apoio constante e companheirismo em todos os instantes que estivemos juntos. Meu muito obrigado.

À Kity, pela imensa alegria demonstrada durante os nossos momentos de lazer e sobretudo pelas palavras de carinho.

À Rose e Lia, cuja convivência amiga foi importante para superar os obstáculos.

À turma do laboratório, Enny, Maurício, Angela, Márcia, Rossana, Josivanda, Mônica, Flávia e Daniella Mara por terem formado um ambiente de discussão agradável e proveitoso do qual fiz parte.

À Danúzia, Maria de Jesus e Hugo, pela partilha de moradia, afeto e caloroso convívio, em meu tempo em Campinas.

À Aluizio, Guilherme, Pedro Guedes, Tânia, Alessandra Lopes, Vítor e Henelyta pela amizade.

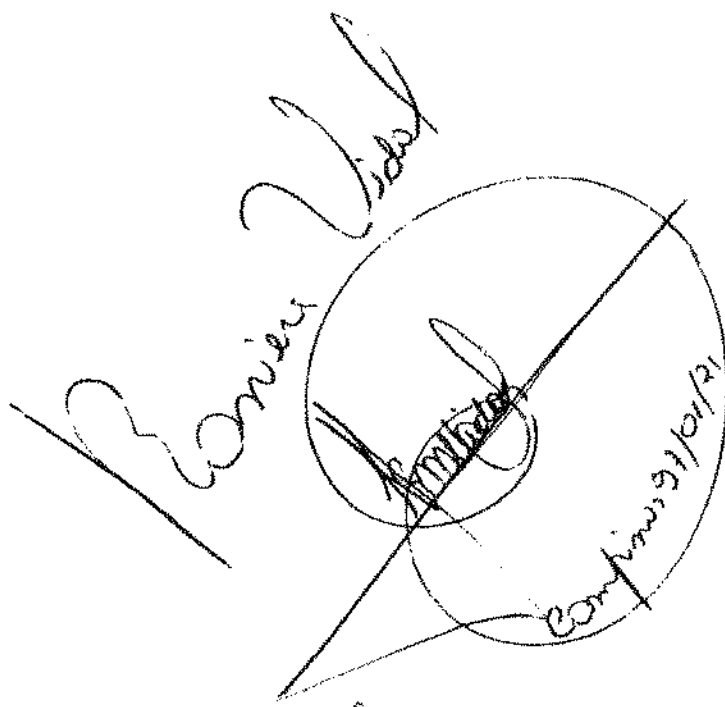
Ao Prof. Dr. Enéas Gomes Filho e ao Prof. Dr. José Tarquinio Prisco do Departamento de Bioquímica e Biologia Molecular (UFC), pela confiança, amizade e incentivo.

Aos funcionários da FEA, em particular aos da Biblioteca, da Coordenação de Pós-Graduação e do Centro de Informática.

Aos Membros da Banca Examinadora, pela contribuição nas correções e sugestões, que permitiram o aprimoramento deste trabalho

À todos, o meu muito obrigado!

Renier Vidal



confins 21/04/21

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.2 - Objetivo.....	4
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 - Manga.....	5
2.1.1 - Fibras.....	8
2.1.2 - Suco.....	9
2.1.3 - Reologia.....	10
2.2 - ESTUDOS REOLÓGICOS.....	10
2.2.1 - Fluidos newtonianos.....	10
2.2.2 - Fluidos não-newtonianos.....	11
2.2.3 - Classificação geral do comportamento reológico.....	12
2.2.3.1 - Fluidos pseudoplásticos.....	12
2.2.3.2 - Fluidos dilatantes.....	13
2.2.3.3 - Fluidos de Bingham.....	13
2.2.3.4 - Fluidos pseudoplásticos com tensão inicial.....	14
2.2.3.5 - Fluidos dilatantes com tensão residual.....	14
2.2.3.6 - Fluidos tixotrópicos.....	14
2.2.3.7 - Fluidos reopéticos.....	15
2.2.3.8 - Fluidos viscoelásticos.....	16

2.3 - Modelos Reológicos.....	17
2.3.1 - Modelo de Casson.....	18
2.3.2- Modelo de Herschel-Bulkley.....	19
2.3.3 - Modelo de Mizrahi-Berk.....	20
2.4 - MEDIDAS REOLÓGICAS.....	21
2.4.1 - Reômetro capilar.....	21
2.4.2 - Reômetro rotacional de cilindro concêntrico.....	23
2.4.3 - Reômetro rotacional de cone e placas paralelas.....	25
2.4.4 - Reômetro de placas paralelas.....	25
2.4.5 - Reômetro de esfera descendente.....	26
2.5 - Comportamento reológico dos sucos de frutas.....	26
2.6-Influência da concentração e tamanho das moléculas dos sólidos solúveis sobre o comportamento reológico.....	28
3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1 - Matéria prima e obtenção da polpa.....	31
3.2 - Cálculos de cilindros concêntricos - obtenção de τ e γ	33
3.3 - Reometria.....	37
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41

4.1 - Reômetro Haake Rotovisco modelo RV-20.....	41
4.1.1 - Determinação dos parâmetros reológicos.....	50
4.1.2 - Modelo de Casson.....	51
4.1.3 - Modelo de Ostwald-de-Waele.....	53
4.1.4 - Modelo de Mizrahi-Berk.....	55
4.1.5 - Modelo de Herschel-Bulkley.....	57
4.2 Reômetro Contraves Rheomat 115.....	59
4.2.1 - Modelo de Casson.....	59
4.2.2 - Modelo de Mizrahi-Berk.....	61
4.2.3 - Modelo de Herschel-Bulkley.....	63
4.2.4 - Modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência).....	65
4.3 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS USANDO-SE OS DOIS REÔMETROS.....	67
5 - CONCLUSÃO.....	73
6- SUGESTÕES.....	75
7 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabelas do capítulo 2

Tabela 2.1 - Composição química da manga madura variedade Keitt.....	6
Tabela 2.2 - Dados sobre determinações físicas e químicas de vinte variedades de mangueiras cultivadas no triângulo mineiro.....	7

Tabelas do capítulo 4

Tabela 4.1 - Parâmetro do modelo de Casson. $T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$	52
Tabela 4.2 - Parâmetro do modelo de Ostwald-de-Waelle (Lei da Potência) $T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$	54
Tabela 4.3 - Parâmetro do modelo de Mizrahi-Berk. $T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$	56
Tabela 4.4 - Parâmetro do modelo de Herchel-Bulkley. $T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$	58
Tabela 4.5 - Parâmetro do modelo de Casson. $T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$	60
Tabela 4.6 - Parâmetro do modelo de Ostwald-de-Waelle (Lei da Potência). $T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$	62
Tabela 4.7 - Parâmetro do modelo de Mizrahi-Berk. $T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$	64
Tabela 4.8 - Parâmetro do modelo de Herchel-Bulkley. $T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras do capítulo 2

Figura 2.1 - Curvas de escoamento para vários tipos de fluidos independentes do tempo.....	16
Figura 2.2 - Curvas de escoamento para vários tipos de fluidos dependentes do tempo.....	17
Figura 2.3 - Arranjo experimental de um reômetro do tipo capilar.....	23
Figura 2.4 - Diagrama esquemático do reômetro rotacional de cilindros concêntricos.....	24
Figura 2.5 - Diagrama esquemático do reômetro rotacional de cone e placa.....	25

Figuras do capítulo 3

Figura 3.1 - Fluxograma para obtenção de polpa de manga.....	32
figura 3.2 - Sistema ZA30-Reômetro Haake Rotovisco.....	38
figura 3.3 - Sistema MS-DIN 1075-Reômetro Contraves Rheomat.....	39

Figuras do capítulo 4

Figura 4.1 - Reograma do suco de manga “in natura” (T=30°C, 16,9°Brix), para 5 amostras do mesmo produto.....	43
---	----

Figura 4.2 - Suco de manga “in natura” - média dos reogramas experimentais (T=30°C, 16,9°Brix).....	43
Figura 4.3 - Reograma do suco de manga filtrado em peneira (malha-0,149mm; T=30°C, 16,9°Brix), para 5 amostras do mesmo produto.....	44
Figura 4.4 - Suco de manga filtrado em peneira - média dos reogramas experimentais (malha-0,149mm T=30°C, 16,9°Brix).....	44
Figura 4.5 - Reograma do suco de manga filtrado em peneira (malha-0,59mm; T=30°C, 16,9°Brix), para 3 amostras do mesmo produto.....	45
Figura 4.6 - Suco de manga filtrado em peneira - média dos reogramas experimentais (malha-0,59mm T=30°C, 16,9°Brix).....	45
Figura 4.7 - Reograma do suco de manga filtrado em peneira (malha-0,84mm; T=30°C, 16,9°Brix), para 3 amostras do mesmo produto.....	46
Figura 4.8 - Suco de manga filtrado em peneira - média dos reogramas experimentais (malha-0,84mm T=30°C, 16,9°Brix).....	46
Figura 4.9 - Reograma do suco de manga filtrado em peneira (malha-1,18mm; T=30°C, 16,9°Brix), para 3 amostras do mesmo produto.....	47
Figura 4.10 - Suco de manga filtrado em peneira - média dos reogramas experimentais (malha-1,18mm T=30°C, 16,9°Brix).....	47
Figura 4.11 - Reograma do suco de manga “in natura” (T=30°C, 16,9°Brix), para 3 amostras do mesmo produto.....	48
Figura 4.12 - Suco de manga “in natura” - média dos reogramas experimentais (T=30°C, 16,9°Brix).....	48
Figura 4.13 - Reograma do suco de manga filtrado em peneira (malha-0,149mm; T=30°C, 16,9°Brix), para 3 amostras do mesmo produto.....	49

Figura 4.14 - Suco de manga filtrado em peneira - média dos reogramas experimentais (malha-0,149mm T=30°C, 16,9°Brix).....	49
Figura 4.15 - Reograma do suco de manga centrifugado (T=30°C, 16,9°Brix).....	50
Figura 4.16 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação ajuste pelo modelo de Casson. T=30°C, 16,9°Brix.....	52
Figura 4.17 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação ajuste pelo modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), T=30°C, 16,9°Brix.....	54
Figura 4.18 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação ajuste pelo modelo de Mizrahi-Berk. T=30°C, 16,9°Brix.....	56
Figura 4.19 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley. T=30°C, 16,9°Brix.....	58
Figura 4.20 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação ajuste pelo modelo de Casson. T=30°C, 16,9°Brix.....	60
Figura 4.21 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação ajuste pelo modelo de Mizrahi-Berk. T=30°C, 16,9°Brix.....	62
Figura 4.22 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley. T=30°C, 16,9°Brix.....	64
Figura 4.23 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação ajuste pelo modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência). T=30°C, 16,9°Brix.....	66
Figura 4.24 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação ajuste pelo modelo de Casson. T=30°C, 16,9°Brix-Reômetro Haake Rotovisco modelo RV-20.....	69

Figura 4.25 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação ajuste pelo modelo de Casson. T=30°C, 16,9°Brix-Reômetro Contraves Rheomat 115.....	69
Figura 4.26 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação ajuste pelo modelo de Mizrahi-Berk. T=30°C, 16,9°Brix-Reômetro Haake Rotovisco modelo RV-20.....	70
Figura 4.27 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação ajuste pelo modelo de Mizrahi-Berk. T=30°C, 16,9°Brix Reômetro Contraves Rheomat 115.....	70
Figura 4.28 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley. T=30°C, 16,9°Brix Reômetro Haake Rotovisco modelo RV-20.....	71
Figura 4.29 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley. T=30°C, 16,9°Brix Reômetro Contraves Rheomat 115.....	71
Figura 4.30- Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação ajuste pelo modelo de Ostwald-de-Waelle (Lei da Potência). T=30°C, 16,9°Brix - Reômetro Haake Rotovisco modelo RV-20.....	72
Figura 4.31- Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação ajuste pelo modelo de Ostwald-de-Waelle (Lei da Potência) T=30°C, 16,9°Brix - Reômetro Contraves Rheomat 115.....	72

NOMENCLATURA

C	Concentração de sólidos solúveis em °Brix
D	Diâmetro interno do tubo
h	Altura
L	Comprimento do tubo
M	$d\ln\Omega / d\ln\tau$, coeficiente angular
N	Concentração molar de sólidos
n_H	Índice de comportamento de Herschel-Bulkley
n_M	Índice de comportamento de Mizrahi-Berk
Q	Vazão
r	Raio interno do cilindro
R_c	Raio do copo
R_B	Raio do cilindro interno
R	Coeficiente de correlação
SSR	Soma dos quadrados dos resíduos
T	Torque
K_H	Índice de consistência de Herschel-Bulkley
K_M	Índice de consistência de Mizrahi-Berk
K_c	Índice de consistência de Casson
K_{OM}	Raiz quadrada da tensão inicial
K_O	Raiz quadrada da tensão inicial
V	Velocidade linear
X^2	Qui-quadrado

Δp Queda de pressão ao longo de L

Letras gregas

τ Tensão de Cisalhamento

γ Taxa de Deformação

τ_{OH} Tensão inicial de Herschel-Bulkley

η Viscosidade absoluta

Ω Velocidade angular

ξ Relação de raios do copo e do cilindro

Tese de Mestrado: Estudo Reológico do Suco de Manga - Efeito dos sólidos Insolúveis

Autor: José Raniere Mazile Vidal Bezerra - Engenheiro de Alimentos

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto

Depto. de Engenharia de Alimentos - FEA - UNICAMP - fevereiro / 1997

RESUMO

Neste trabalho experimental foi determinado o comportamento reológico de polpa de manga variedade Keitt a 30°C. A polpa integral foi produzida em laboratório e refinada num “finisher” com abertura de 1,6mm. A polpa integral foi peneirada com diferentes malhas e também centrifugada. A polpa integral, as frações peneiradas e a centrifugada foram analisadas em dois reômetros com geometria de cilindros concêntricos. Os reogramas foram descritos pelos modelos de Ostwald-de-Waele, Casson, Herschel-Bulkley e Mizrahi-Berk. Foi feita uma comparação entre os ajustes dos modelos segundo os resultados fornecidos pelos reômetros Haake Rotovisco e Contraves Rheomat. Todas as amostras apresentaram comportamento pseudoplástico. O melhor ajuste para o reômetro Haake Rotovisco foi dado pelo modelo de Casson, Herschel-Bulkley e Mizrahi-Berk, enquanto que para o reômetro Contraves Rheomat o melhor ajuste foi dado pelo modelo de Mizrahi-Berk. Os resultados obtidos mostraram que o reômetro Haake Rotovisco obteve um melhor ajuste para todos os modelos estudados.

Palavras chave: Reologia, Manga, Reometria, Pseudoplástico

Master thesis: Rheological Study of Mango Juice -Effect of insoluble solids

Author: José Raniere Mazile Vidal Bezerra - Food Engineer

Advisor: Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto

Department of Food Engineering - FEA - UNICAMP - february / 1997

ABSTRACT

This is an experimental investigation aimed at studying the rheological behaviour of mango pulp, variety Keitt, at 30°C. The whole pulp was prepared in the laboratory and refined using a finisher with a mesh 1.6mm. The whole pulp was passed through sieves of different mesh values and also centrifuged. All pulp fractions, both sieved and centrifuged and also whole pulp, were analysed using two rheometers both of the rotating cylinder type. The rheograms were described by the Ostwald-de-Waele, Casson, Herschel-Bulkley and Mizrahi-Berk rheological models. Results from the two rheometers Haake Rotovisco and Contraves Rheomat, were compared according to the rheological models used. All samples showed pseudoplastic behaviour. The best fit for the Haake Rotovisco instrument was achieved using the Casson, Herschel-Bulkley and Mizrahi-Berk models while for the Contraves Rheomat instrument the best fit was Mizrahi-Berk. Considering all the models used, the best fit resulted from the Haake Rotovisco data.

Key Words: Rheology, Mango, Rheometry, Pseudoplastic.

1. INTRODUÇÃO

A manga (***Mangífera indica* L**) é uma fruta muito saborosa e aromática seguramente uma das frutas mais importantes dos trópicos, tendo aceitação crescente no mercado mundial. A polpa pode ser firme ou aquosa, com ou sem fibras, de cor amarelada a alaranjada de sabor variável e um conteúdo de açúcar entre 14 a 28%.

A manga é da família das Anacardiáceas, com polpa comestível, forma irregular e variável conforme a espécie. É considerada um dos melhores frutos comestíveis do mundo devido a seu excelente aroma, sabor exótico e cores exuberantes. Provavelmente trazida da Índia, maior produtor e exportador mundial, foi introduzida no Brasil em 1861, sendo atualmente comum em todos os estados brasileiros, (Salunke & Desai, 1984).

O Brasil apresenta modesta atuação no mercado internacional de manga “in natura” quando comparado com Israel e Índia, tradicionais exportadores. O Nordeste é a principal região produtora. A manga é uma das fontes naturais mais ricas em caroteno, precursor da vitamina A, contém também quantidade apreciável de ácido ascórbico (vitamina C), quando em estado verde, que diminui progressivamente com a maturação da fruta (Medina et al. 1981).

Além do interesse da fruta “in natura”, são também importantes os produtos processados e apresentados comercialmente na forma de suco, néctar, sorvete, sobremesas gelificadas e outros. Para a fabricação desses produtos utiliza-se a polpa concentrada e para a definição dos processos é indispensável o conhecimento das suas propriedades físicas e químicas. Dentre essas propriedades o comportamento reológico ocupa posição de grande destaque. São escassos os dados sobre propriedades reológicas dos sucos, polpas e outros concentrados de frutas brasileiras. A matéria prima brasileira apresenta características diferentes daquela produzida em outras partes do mundo, principalmente no que diz respeito aos teores de polpa e de açúcares que vão influenciar diretamente no teor de sólidos solúveis e insolúveis. Com isso a

maioria dos projetos de equipamentos utilizados no processamento de frutas são baseados em estimativas dos parâmetros reológicos de materiais produzidos no exterior. A crescente necessidade e procura dos parâmetros reológicos para os diversos fluidos manipulados nas indústrias de processamento está ligada também à grande importância econômica que estes fluidos e equipamentos de manipulação representam atualmente.

Dá a importância de criteriosa caracterização reológica dos produtos brasileiros, considerando a influência dos muitos fatores que afetam as propriedades de escoamento. As informações sobre o comportamento reológico dos fluidos permitem o cálculo prático para situações importantes como: evaporação, bombeamento, troca de calor, estocagem, filtração e separação de sólidos.

A descrição do comportamento reológico é feita através de modelos empíricos que são usados para relacionarem os dados de tensão de cisalhamento e taxa de deformação, e assim facilitar os cálculos de engenharia. Os modelos mais práticos e utilizados neste trabalho são: Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), Herschel-Bulkley (H-B), Mizrahi-Berk (M-B) e Casson e são representados como:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad \text{Ostwald-de-Waele (Lei da Potência)}$$

$$\tau - \tau_{OH} = K_H \dot{\gamma}^{n_H} \quad \text{Herschel-Bulkley (H-B)}$$

$$\tau^{1/2} - K_{OM} = K_M \dot{\gamma}^{n_M} \quad \text{Mizrahi-Berk (M-B)}$$

$$\tau^{1/2} = K_{OC} + K_C \dot{\gamma}^{1/2} \quad \text{Casson}$$

onde τ é a tensão de cisalhamento (Pa), $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação (1/s), τ_{0H} , K_{OM} e K_{OC} são parâmetros de tensão inicial de escoamento, K , K_H , K_{OM} , K_M , K_{OC} e K_C são índice de consistência e n , n_H , n_M são índice de comportamento.

Três desses modelos, contêm o termo de tensão inicial, que é uma característica muitas vezes desejável em aplicações tecnológicas para fluidos alimentícios, entretanto de difícil determinação experimental na maioria dos instrumentos comerciais. Vocadlo e Charles (1971), criticaram e mostraram as desvantagens dos diferentes métodos experimentais na determinação da tensão inicial e projetaram um sistema de cilindros concêntricos com grande profundidade, para uma determinação que acreditaram mais precisa. Atualmente os computadores tornam mais fácil e prática essa determinação, porém esses valores parecem não escapar do destino de serem parâmetros de ajuste.

Os modelos de Herschel-Bulkley (H-B) e Mizrahi-Berk (M-B) possuem três parâmetros a serem determinados, enquanto os modelos de Casson e Ostwald-de-Waele (Lei da Potência) apenas dois, e portanto nestes últimos modelos, podem ser diretamente determinados por regressão linear. No caso dos modelos de Herschel-Bulkley (H-B) e Mizrahi-Berk (M-B), o método linear só poderá ser usado quando a magnitude da tensão inicial poder ser determinada experimentalmente ou por outro método de recorrência.

1.2 Objetivo

O objetivo desse trabalho foi estudar experimentalmente o comportamento reológico do suco de manga, produzido no laboratório. Esse comportamento foi descrito em termos dos modelos de Ostwald-de-Waelle (Lei da Potência), Herschel-Bulkley (H-B), Mizrahi-Berk (M-B) e Casson em função do teor de sólidos insolúveis, à temperatura fixa de 30°C.

Para este estudo foram utilizados reômetros de cilindros concêntricos que apresentam pequenas diferenças em detalhes geométricos

Os resultados experimentais obtidos são trabalhados no sentido de buscar uma unificação para explicar o comportamento reológico. Essa unificação tem enorme interesse do ponto de vista prático, sendo arduamente buscado por engenheiros que trabalham com processos e equipamentos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Generalidades

2.1 Manga

A manga é um fruto de regiões tropicais e subtropicais e de grande demanda em todo o mundo, tanto para o consumo “in natura” quanto industrializada. É considerada um dos frutos de melhor qualidade, sabor e aroma. Devido à sua grande aceitação por parte dos consumidores europeus, sua cultura se disseminou por vários países e sua tecnologia de produção foi acentuadamente melhorada (Prado, 1994).

Segundo Vasquez-Salinas et al. (1985), a composição tem sido investigada e os dados de composição de polpa comestível são apresentados na Tabela 2.1. As principais vitaminas presentes neste fruto são a vitamina C, pró-vitamina A (β -caroteno) e pequenas quantidades de vitamina B.

O teor de vitamina C, pró-vitamina A (β -caroteno) e pequena quantidade de vitamina B varia de cultivar para cultivar, dependendo de sua origem (Nagy & Shaw, 1980). Os frutos jovens são adstringentes, ácidos e ricos em vitamina C, os frutos maduros são doces, ricos em pró-vitamina A, moderados em vitamina C e altamente aromáticos (Hulme, 1970).

Tabela 2.1 - Composição química da manga madura variedade Keitt.

umidade (%)	85 - 90
sólidos solúveis totais ° Brix	19,9
pH	6,2
vitamina C (mg/100g)	76,5
açúcares totais (%)	17,7
carotenóides totais (µg/100g)	5187
β-caroteno (µg/100g)	2758

Fonte: Vasquez-Salinas e Laksmiroyana (1985).

As características físicas responsáveis pela aparência externa dos frutos, tais como tamanho, forma e coloração da casca, constituem-se como fatores importantes a aceitabilidade pelos consumidores. Associada às características físicas, é também de grande importância os constituintes físicos-químicos e químicos da polpa, que são responsáveis pelo sabor e aroma característicos dos frutos.

Por outro lado, há de se considerar que existem diferenças na qualidade dos frutos, inclusive para uma mesma variedade, devendo-se entre outros fatores, às distintas condições climáticas existentes nas diferentes regiões de cultivo, segundo Pinto et al. (1981).

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

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

Variedade	Peso dos frutos (g)	Polpa(%)	pH	Acidez Total (%)	Sólidos Solúveis Totais (°Brix)
Brasil	254,8	73,3	4,40	0,24	14,7
Simmonds	436,0	77,4	4,16	0,23	15,6
Keitt	379,0	77,0	2,24	0,28	17,8
Extrema	431,7	78,1	3,98	0,29	14,8
Kent	378,0	75,6	4,22	0,33	18,2
Primor de amoreira	421,0	75,9	4,06	0,42	14,8
Carlotão	446,2	79,3	4,04	0,32	15,8
Van Dyke	316,5	77,4	4,16	0,29	17,5
M - 20222	266,6	74,9	3,86	0,35	18,6
Eldon	499,5	77,9	4,20	0,25	14,4
Coração magoado	256,9	74,2	4,68	0,16	14,7
Zill	359,5	73,6	4,64	0,21	18,6
Edward	579,8	81,3	4,38	0,27	19,2
Ruby	210,1	73,6	3,98	0,36	16,8
Espada de Itaparica	261,0	74,0	3,92	0,44	16,1
Surpresa	381,0	80,4	4,18	0,32	16,1
Tommy atkins	412,5	76,7	4,24	0,21	13,9
Haden	436,9	80,7	4,14	0,23	16,1
Kensington	418,5	74,2	4,58	0,18	15,6
Florigon	264,9	74,5	3,68	0,37	15,7

Fonte: Dalmo et ali. (1988)

2.1.1 Fibras

O grande interesse de estudar as fibras, deve-se à influências que elas exercem sobre o comportamento reológico no processamento de sucos. Os primeiros a identificarem as fibras foram McCance e Lawrence em 1929, a qual foi chamada de “carboidratos não disponíveis”. Este conceito foi usado até 1953, quando foi sugerido por Hipsley o termo “Fibra Alimentar” para designar as hemicelulose, celulose e ligninas presentes nas paredes celulares das plantas. No entanto Trowell em 1972, conceituou a “Fibra Alimentar” como o material não digerível das paredes celulares das plantas, o qual em 1976 passou a incluir todos os polissacarídeos e ligninas não digeríveis pela secreção de enzimas endógenas do trato digestivo humano (Southgate,1981). Atualmente esta definição é considerada inadequada porque inclui importantes polímeros como os produtos da reação de Maillard, amidos resistentes (ex. amido retornado) e polidextroses. O termo considerado mais adequado é Fibra Alimentar Total (FAT), que inclui todos os polímeros não digeríveis presentes nos alimentos e não degradáveis por enzimas digestivas do intestino delgado (Gordon,1989). Os principais componentes da FAT são as celulosas, β -glucana, pectina, hemicelulose, lignina, gomas e mucilagens (Schneeman,1989). A FAT é composta basicamente por uma fração insolúvel em água denominada Fibra Alimentar Insolúvel (FAI) representada pela celulose, lignina e algumas hemicelulose insolúveis e por uma fração solúvel em água denominada Fibra Alimentar Solúvel (FAS) formada pelas pectinas, polissacarídeos algáceos e algumas hemiceluloses solúveis (Roehrig, 1988).

Nutricionalmente, o termo fibra é restrito ao material filamentosos dos alimentos. O termo fibra dietética foi introduzido para assinalar todas as estruturas celulares das paredes vegetais que não são digeridas pelos sucos digestivos humanos. Atualmente, a denominação de fibra crua foi substituída por fibras dietética, que designa a parte residual dos vegetais resistentes a hidrólise enzimática no intestino humano, embora parcialmente atacada pelas bactérias do cólon.

Fibra dietética foi definida como um termo mais genérico, associando a totalidade dos componentes não digestivos das paredes celulares, incluindo a celulose, a hemicelulose, a lignina e também às ceras (Franco, 1992).

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

As fibras podem ser classificadas quanto ao seu efeito fisiológico em fibras solúveis e fibras insolúveis.

As fibras solúveis em água são representadas pela pectina, as gomas e certas hemiceluloses. ex: feijão, frutas, aveia e cevada e as fibras insolúveis são constituídas pela celulose, hemicelulose e lignina. ex: verduras e a maioria dos grãos ^{cereais} de ~~ceras~~.

2.1.2 Suco

Na definição de Ibarz et al. 1992, sucos são os mais importantes líquidos derivados de frutas na indústria de alimentos e podem ser classificados de acordo com o seu conteúdo de polpa em dois principais grupos: purês e sucos.

Nagy et al. 1993, afirmam que para o propósito de processamento comercial sucos de frutas podem ser considerados como uma solução aquosa de açúcar, ácidos, essências, pigmentos, minerais, vitaminas, gorduras, proteínas e

substâncias pécnicas. Note-se que nesta definição apenas os sólidos solúveis são contemplados. Esta é uma típica definição aplicável a sucos clarificados.

2.1.3 Reologia

É a ciência que estuda as propriedades mecânicas dos materiais quando solicitados por forças externas. O campo da reologia estende-se desde a mecânica de fluidos newtonianos até à elasticidade de Hooke (Bird et al. 1960).

O conhecimento do comportamento reológico de produtos alimentícios é essencial para várias aplicações, entre as quais projetos e avaliação de processos, controle de qualidade, correlação com a avaliação sensorial e compreensão de estrutura (Rao, 1977 e Rao, 1986).

2.2 ESTUDOS REOLÓGICOS

Os fluidos podem ser classificados como newtonianos ou não-newtonianos:

2.2.1 Fluidos Newtonianos

As propriedades reológicas de fluidos newtonianos são independentes da taxa de deformação e do histórico anterior de cisalhamento, dependendo somente da composição e temperatura.

Fluidos newtonianos apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, com coeficiente linear igual a zero. Fluidos que apresentam comportamento newtoniano são todos os gases, líquidos de baixo peso molecular e soluções aquosas diluídas de sais e açúcares. Dentre os alimentos, tem comportamento newtoniano, por exemplo: óleos, bebidas alcoólicas, refrigerantes, leite, sucos clarificados de maçã e de uva.

A equação matemática que descreve seu comportamento é dada por:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

Onde:

τ = Tensão de cisalhamento ($\text{N m}^{-2} = \text{Pa}$)

$\dot{\gamma}$ = Taxa de deformação (S^{-1})

η = Viscosidade absoluta (Pa s)

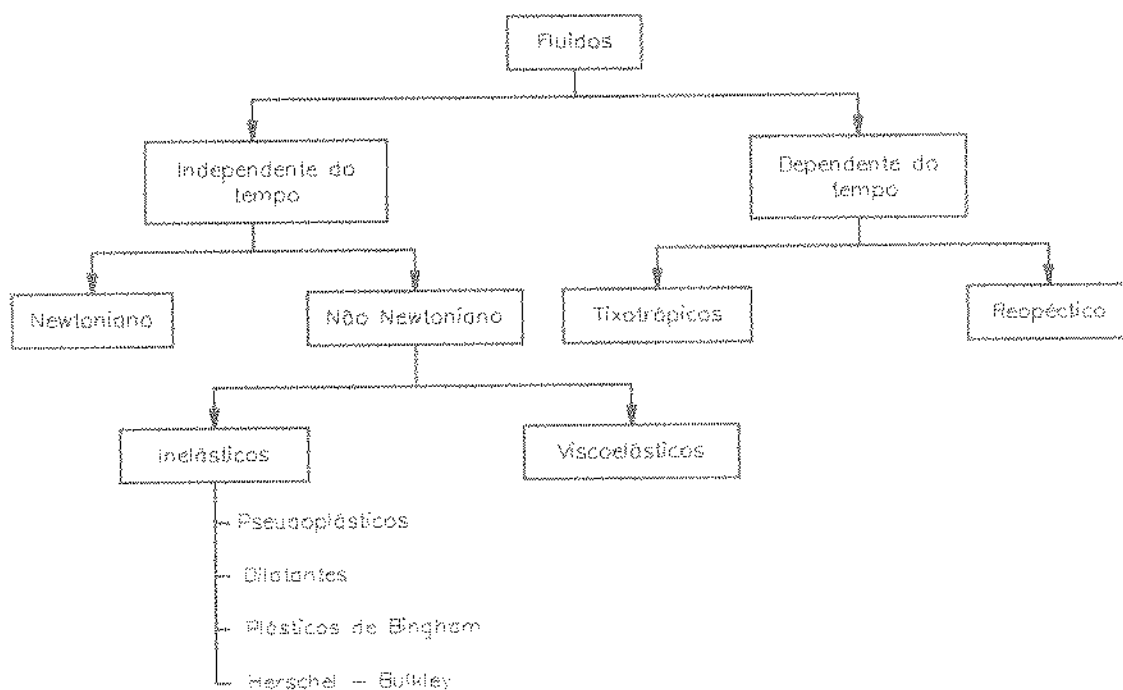
2.2.2 Fluidos Não-Newtonianos

Todos os fluidos que não exibem o comportamento descrito pela Eq. (1) podem ser chamados não-newtonianos e classificados como independentes ou dependente do tempo, (Holdsworth, 1971; Rao, 1977 e Rao, 1986).

Para os fluidos não-newtonianos independentes do tempo, à temperatura e composição constantes, a viscosidade aparente depende somente da taxa de deformação ou da tensão de cisalhamento.

Para efeitos de estudo, os fluidos não-newtonianos são classificados em categorias, de acordo com o desvio que apresentam à lei de newton:

2.2.3 Classificação Geral do Comportamento Reológico



Fonte: Sundfeld (1994)

2.2.3.1 Fluidos pseudoplásticos

Neste grupo está a maioria dos fluidos de componentes de comportamento não-newtoniano. São fluidos independentes do tempo, sem tensão residual, que começam a escoar sob a ação de tensões de cisalhamento infinitesimais.

Para os fluidos pseudoplásticos, a taxa de acréscimo na tensão de cisalhamento diminui com o aumento da taxa de deformação.

Essa classe é representada por produtos como polpas e sucos altamente concentrados de frutas, caldos de fermentação, melaço de cana (Charm, 1960; Holdsworth, 1971) e soluções de pectina (Saravacos & Moyer, 1967). Segundo Holdsworth (1971), esse comportamento é explicado pela modificação da estrutura de cadeias longas de moléculas com o aumento do gradiente de velocidade. Essas cadeias tendem a se alinhar paralelamente às linhas de corrente diminuindo a resistência ao escoamento. Esses fluidos tendem a um comportamento newtoniano a grandes gradientes de velocidades, devido ao total alinhamento molecular. Também em baixos gradientes de velocidades tendem ao comportamento newtoniano devido a completa distribuição ao acaso na orientação das partículas.

2.2.3.2 Fluidos dilatantes

Os fluidos dilatantes são independentes do tempo, sem tensão residual, que começam a escoar sob a ação de tensão de cisalhamento infinitesimais. Para os fluidos dilatantes a taxa de cisalhamento aumenta com o aumento da taxa de deformação. Incluídos neste grupo são as suspensões de amido, soluções de farinha de milho, soluções concentradas de goma e de açúcares (Onofre, 1995).

2.2.3.3 Fluidos de Bingham

Os fluidos de Bingham são independentes do tempo, que apresentam tensão inicial a partir da qual o fluido apresenta um comportamento linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação. São geralmente soluções e ou

suspensões concentradas de polímeros como são os casos de amido e proteínas. Conforme Van Wazer et al. (1963) e Menjivar & Rha (1980). Purê de batata, mostarda, catchup, chocolate fundido são exemplos de fluidos que apresentam comportamento do tipo Bingham.

2.2.3.4 Fluidos pseudoplásticos com tensão inicial

Muitos fluidos apresentam uma tensão inicial como os de Bingham mas, a partir desse ponto seu comportamento reológico é semelhante aos dos fluidos pseudoplásticos (Onofre, 1995). Sucos concentrados, não clarificados e congelados são exemplos típicos deste comportamento (Branco, 1995).

2.2.3.5 Fluidos dilatantes com tensão residual

Os fluidos pertencentes a esse grupo apresentam um comportamento reológico análogo ao dos dilatantes, após ultrapassada a tensão residual (Onofre, 1995). Soluções e suspensões concentradas de amido de milho, ou gomas com açúcares são exemplos deste comportamento.

2.2.3.6 Fluidos tixotrópicos

Fluidos desse grupo apresentam um comportamento reológico dependente do tempo. A tensão de cisalhamento decresce reversivelmente com o tempo, fixadas a temperatura e taxa de deformação, ou seja, o processo de rompimento

das estruturas dos fluidos tixotrópicos depende do tempo, além de depender da taxa de deformação (Skelland, 1967). Incluindo neste grupo estão os géis de alginato e sucos integrais concentrados.

Se a curva reológica de fluidos desse grupo for obtida através de um único experimento, no qual a taxa de deformação varia monotonicamente crescente desde zero até um valor máximo e, imediatamente após atingir o máximo, a taxa de deformação varia monotonicamente e decrescente até zero, obter-se-á uma curva de histerese (Skelland, 1967).

2.2.3.7 Fluidos reopéticos

Os fluidos denominados reopéticos também são conhecidos como fluidos de tixotropia negativa (Govier, 1972), ou anti-tixotrópicos (Skelland, 1967). Apresentam acréscimo reversível na tensão de cisalhamento com o tempo, para uma dada temperatura e taxa de deformação. Esses fluidos também apresentam uma curva de histerese porém a viscosidade aumenta com o tempo. Este tipo de comportamento, com repetibilidade (ou recuperação de estrutura) não é comum em alimentos. São mais comuns os casos de formação de estruturas como na preparação de “creme chantilly” e de clara em neve. Note-se que nestes casos há evolução e não um comportamento que pode ser repetido continuamente. A cristalização também é exemplo de evolução, podendo no caso de açúcar ser monitorada por um reômetro que acompanha continuamente o processo. Esta é uma aplicação moderna para o controle da cristalização do açúcar.

2.2.3.8 Fluidos viscoelásticos

Esses fluidos apresentam propriedades viscosas e elásticas, sendo que as propriedades viscosas podem ser não-newtonianas e dependentes do tempo. As propriedades elásticas se manifestam através da presença de tensões perpendiculares à direção do cisalhamento e que são de magnitude diferente das tensões paralelas à direção do cisalhamento (Torrest, 1982). Quase todas as soluções, de polímeros, mesmo diluídas, apresentam comportamento viscoelástico e muitas vezes não é detectado por instrumentos não preparados para essas medidas. Clara de ovo é o exemplo típico do comportamento viscoelástico.

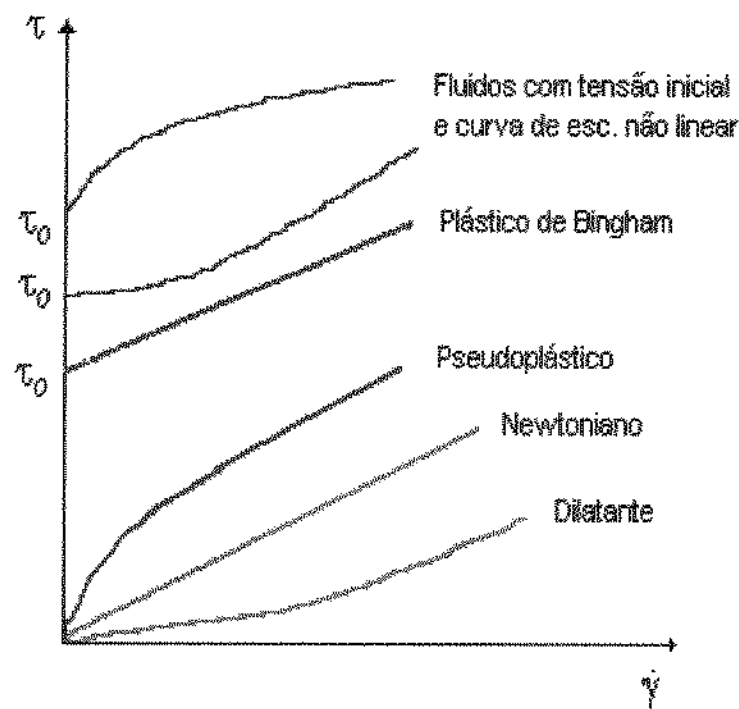


Figura 2.1 - Curvas de escoamento para vários tipos de fluidos independentes do tempo.

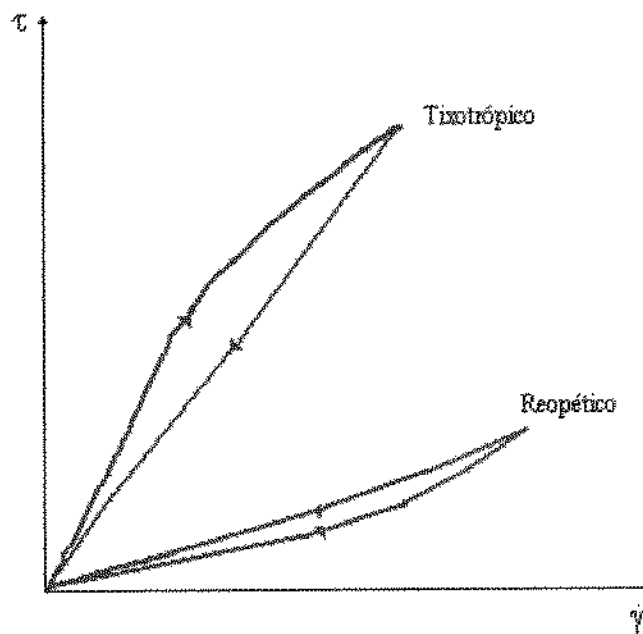


Figura 2.2 - Curvas de escoamento para fluidos com comportamento dependente do tempo

2.3 Modelos Reológicos

Os modelos reológicos são úteis para relacionar propriedades reológicas de um fluido com grandezas práticas, como concentração, temperatura, pH, índice de maturação, etc. Esse conhecimento é indispensável no controle de qualidade, controle intermediário em linhas de produção e no projeto e dimensionamento de equipamento e processos.

Podem ser isotérmicos ou não isotérmicos. No primeiro caso, descrevem comportamento do fluido a uma temperatura fixa, no último, incluem relações específicas, como funções da temperatura. Dependendo do modelo utilizado, possuem ou não a tensão inicial (Branco, 1995).

2.3.1 Modelo de Casson

Este modelo foi desenvolvido para uma suspensão de partículas interagindo em um meio newtoniano. Casson (1959), propôs a seguinte expressão matemática:

$$\tau^{1/2} = K_{oc} + K_c \gamma^{1/2} \quad (2)$$

τ = Tensão de Cisalhamento

γ = Taxa de Deformação

K_{oc} = Tensão inicial

K_c = Viscosidade Plástica de Casson

O modelo de Casson foi adotado como método oficial na determinação da tensão inicial pelo Instituto Internacional do Chocolate. Entretanto, Mizhari e Berk (1972); Rao et al. (1981), mostraram que este modelo não se adapta a baixos valores de taxa de deformação quando aplicado para suco de laranja concentrado e concentrado de tomate, Rao e Cooley (1982).

Vitali (1981), calculou a tensão inicial por este modelo para ter uma estimativa de τ_0 na aplicação dos modelos de Mizrahi-Berk e Herschel-Bulkley. Isso é questionável pois, em baixas taxas de deformação, o valor da taxa inicial obtido por essa metodologia é maior do que aquele obtido experimentalmente, conforme mostra os resultados de Telis e Vieira (1992).

2.3.2 Modelo de Herschel-Bulkley

O modelo de Herschel-Bulkley é uma forma modificada de Ostwald-de waelle, (Rao e Coolley, 1982), ou seja o que diferencia um do outro é a presença (no primeiro modelo) ou ausência (no último) do termo da tensão de cisalhamento inicial.

É um modelo análogo ao de Bingham, sendo representado pela equação mostrada abaixo:

$$\tau - \tau_{OH} = K_H \dot{\gamma}^{n_H} \quad (3)$$

Onde:

τ_{OH} = tensão de cisalhamento inicial

K_H = índice de consistência

n_H = índice de comportamento do fluido

Esse modelo precisa ser resolvido através de regressão não linear, pois tem três parâmetros a serem determinados. Quando o valor de τ_{OH} for conhecido, a resolução dessa equação pode ser feita através de regressão linear. O procedimento mais empregado é determinar experimentalmente τ_{OH} ou então usar o valor estimado pelo modelo de Casson (1959).

Crandall et al. (1982), utilizaram esse modelo para descrever o comportamento reológico de suco de laranja concentrado.

2.3.3 Modelo de Mizrahi-Berk

Para descrever o comportamento reológico de suco de laranja concentrado, Mizrahi e Berk (1972), desenvolveram uma equação reológica baseada no modelo de uma suspensão de partículas interagindo em um solvente pseudoplástico. Esta proposta é uma modificação do modelo de Casson, que se reduz a este quando n_M é igual a 0,5.

$$\tau^{1/2} - K_{OH} = K_M \dot{\gamma}^{n_M} \quad (4)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação

K_M = índice de consistência

n_M = índice de comportamento do fluido

K_{OH} = raiz quadrada da tensão inicial

Os seus autores concluíram que este modelo representa melhor o comportamento do suco de laranja concentrado do que os modelos de Casson ou de Herschel-Bulkley.

2.4 Medidas Reológicas

Para fluidos newtonianos a viscosidade é obtida através de uma única medida de tensão de cisalhamento e a correspondente taxa de deformação. Porém uma única medida não é suficiente para identificar um fluido como newtoniano. São necessários vários dados de tensão de cisalhamento e as correspondentes taxas de deformação, para então se avaliar o comportamento de um fluido e adotar um modelo de comportamento reológico (Onofre, 1995). Existem quatro tipos básicos de equipamentos de uso comum para a obtenção de parâmetros reológicos:

Reômetro de tubos capilar;

Reômetro rotacional de cilindros concêntricos;

Reômetro rotacional de cone e placa;

Reômetro de esfera descendente (pratos paralelos).

2.4.1 Reômetro Capilar

A situação mais simples é aquela do escoamento no interior de um tubo de seção circular. Tal arranjo é conhecido como viscosímetro capilar. Para fluidos newtonianos a viscosidade é dada pela expressão de Hagen-Poiseuille.

$$\mu = \frac{\left(\frac{D\Delta p}{4L} \right)}{\left(\frac{32Q}{\pi D^3} \right)} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (5)$$

Onde:

D = diâmetro interno do tubo

L = comprimento do tubo

Q = vazão

Δp = queda de pressão ao longo de L

γ = taxa de deformação

μ = viscosidade

τ = Tensão de Cisalhamento

enquanto que para fluidos não-newtonianos, independentes do tempo, a equação pode ser modificada para produzir:

$$\gamma = \frac{\Delta p}{4L}$$

$$\gamma = \frac{32Q}{\pi D^3}$$

$$\gamma = \frac{3}{4y} + \frac{1}{4} \frac{d(\ln y)}{d(\ln \tau)}$$

Um arranjo experimental do tipo capilar que é simples, de fácil operação e de custo bastante reduzido, é mostrado na Figura (2.3). Neste tipo de montagem, é muito importante certificar-se de que a relação L/D seja tal que os efeitos indesejáveis, principalmente de entrada e de saída, sejam desprezíveis. Na prática esse valor deve ser maior do que 1.000 (Gasparetto, 1983).

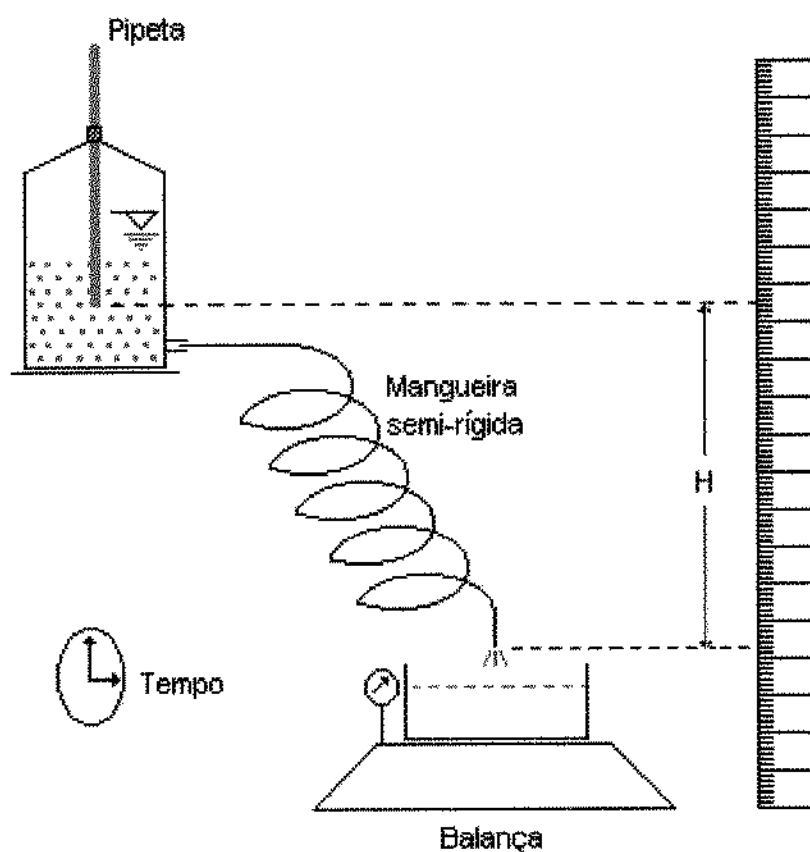


Figura 2.3 - Arranjo experimental de um reômetro do tipo capilar.

2.4.2 Reômetro Rotacional de Cilindro Concêntrico

Estes reômetros são projetados para causar cisalhamento no fluido localizado entre dois cilindros concêntricos sendo que um gira e o outro permanece estacionário permitindo-se obter curvas reológicas, pelo estabelecimento de várias velocidades angulares do cilindro rotativo e do torque correspondente detectado no cilindro de medida que pode ser o rotativo ou o fixo.

Na Figura (2.4) o cilindro interno é suspenso por uma haste fixada num suporte, de modo que esse cilindro permaneça fixo enquanto o cilindro externo gira em

velocidade angular estabelecida. O torque resultante no cilindro interno é lido na escala, (Onofre, 1995).

Os reômetros rotatórios de cilindros concêntricos são de dois tipos:

Cilindro interno fixo com cilindro externo que gira.

Cilindro externo fixo com cilindro interno que gira.

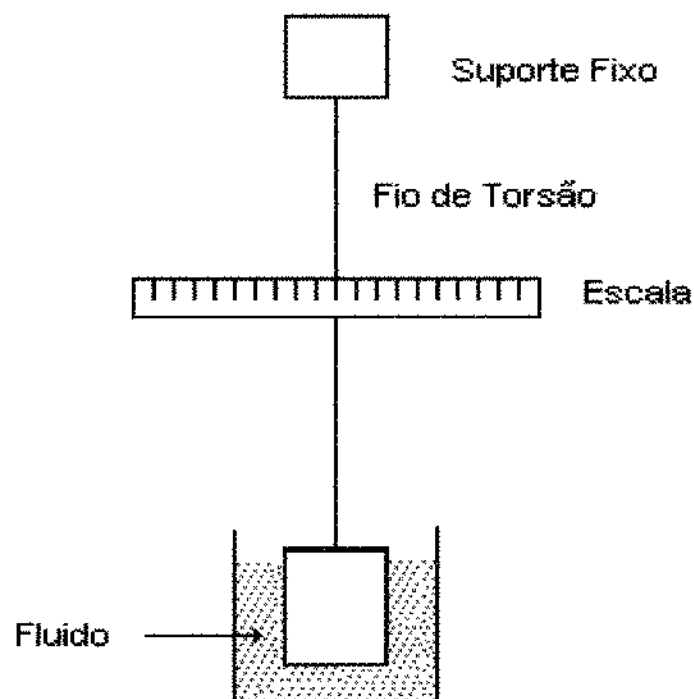


Figura 2.4 - Diagrama esquemático do reômetro rotacional de cilindros concêntricos.

2.4.3 Reômetro rotacional de cone e placa ou placas paralelas

Este instrumento consiste essencialmente de uma placa horizontal e um cone invertido, cujo vértice encontra-se muito próximo do prato. O ângulo entre o prato e a superfície de cone é muito pequena (da ordem de 2° para que seja possível supor $\tan \alpha = \alpha$) e a amostra do fluido está localizada no pequeno espaço do prato do cone (Gehrke, 1996).

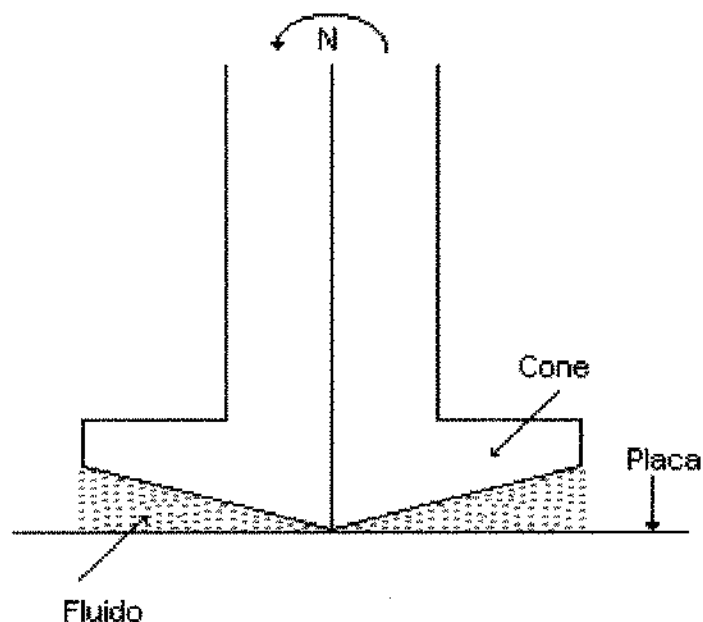


Figura 2.5 - Diagrama esquemático do reômetro de cone e placa

2.4.4 Reômetro de placas paralelas

Este tipo de reômetro é constituído de duas placas paralelas em forma de disco, distantes h uma da outra. A distância entre as placas pode ser variada, obtendo-

se diferentes faixas de taxa de deformação. Da mesma maneira que o de cone e placa, qualquer uma das duas partes pode girar, para medir o torque necessário (Gehrke, 1996).

2.4.5 Reômetro de esfera descendente

Este é um reômetro com um tubo cilíndrico de vidro contendo a amostra. É medido o tempo de queda de uma esfera de aço. Deve ser assegurado que a velocidade da esfera seja constante na região de medida. São disponíveis 6 esferas de diferentes diâmetros.

Nas aplicações é difícil de se definir a tensão de cisalhamento e taxa de deformação. É apropriado apenas para medidas de fluidos newtonianos (Formaggio, 1982).

2.5 Comportamento reológico dos sucos de frutas

A viscosidade e consistência dos sucos e purês de frutos são características físicas importantes, pois influem no desenvolvimento do processo de elaboração e na aceitação do produto pelo consumidor.

As características reológicas específicas de sucos e purês, e a explicação das mudanças que se produzem no fluxo durante determinadas operações do processo, requerem o conhecimento da relação entre as características químicas, físicas e estruturais, no comportamento reológico.

A problemática das análises e da pesquisa das causas que definem a viscosidade e consistência dos produtos fluidos derivados de frutas são originais desde

o começo da industrialização. Até hoje, a medida da viscosidade foi, em grande parte, empírica. A dificuldade inerente na adaptação dos modelos reológicos teóricos para identificar os comportamentos reais, se soma à carência de uma instrumentação adequada e portanto, a falta de uma metodologia analítica idônea.

Os sucos, purês e concentrados de frutas (incluindo os de tomate) formam um grupo de produtos de características similares. Estão constituídos por uma fase dispersante, o soro, na qual se encontram açúcares, ácidos, pectinas solúveis e proteínas. A outra fase é a dispersa, composta por partículas de diferente forma e volume, procedentes dos tecidos das frutas (Jimenes & Duran, 1979)

Para a manipulação destes produtos na indústria, é necessário conhecer suas propriedades reológicas, especialmente quando se trata de submetê-los às operações como: transporte, homogeneização, esterilização e concentração. A informação sobre as propriedades reológicas destes produtos é incompleta no ponto de vista prático, pois a sua natureza complexa e diversificada dificulta a generalização dos dados obtidos para um determinado produto.

Existem pouquíssimos dados sobre a reologia, propriedades térmicas e parâmetros de projetos de suco concentrado brasileiro, fazendo com que a maioria dos projetos de equipamentos utilizados em sua manipulação sejam baseados em estimativas, por vezes grosseiras, de sua propriedade e comportamento (Telis & Gasparetto, 1993) e (Queiroz et al. 1996).

Para correlacionar os parâmetros de escoamento com as características físico-químicas dos componentes de um produto, a abordagem empírica tem sido preferida devido à disponibilidade de metodologia prática que permite apenas o estabelecimento de modelos de comportamento reológico que são mais úteis para aplicações no cálculo de equipamento. Os dados de escoamento são coletados de amostras preparadas variando-se uma propriedade de cada vez e uma equação empírica é derivada através de técnicas de ajuste de curvas. A essência dessa metodologia está na otimização de número de variáveis, se há muitas o experimento pode se tornar

muito complicado, se poucas a equação resultante pode ser inadequada (Amstalden, 1996).

2.6 Influência da concentração e tamanho das moléculas dos sólidos solúveis sobre o comportamento reológico

Ao tentar estabelecer uma relação entre a estrutura e o comportamento reológico de um sistema disperso, verificou-se que a primeira está diretamente relacionada com a composição e natureza química das fases que o integram. As principais características de ambas as fases que mais influenciam, teoricamente, na configuração estrutural e portanto, no seu comportamento reológico, são estas apresentadas à seguir.

Na fase dispersa as mais importantes são: composição química, concentração em volume e em tamanho, forma e distribuição das partículas. A concentração em volume da fase dispersa influi diretamente no grau de interação hidrodinâmica entre as partículas e, portanto, na possível formação de flóculos e agregados. As características físicas das partículas (tamanho, forma e distribuição) influem, por outro lado, na viscosidade das dispersões diluídas, na consistência dos concentrados normais e na viscoelasticidade dos mais concentrados. Por outro lado, influem também na velocidade de formação de flóculos e agregados, pois estes determinam em parte, o número de partículas por unidade de volume. Portanto quanto maior for o tamanho das partículas, e o tipo de distribuição que os sistemas apresentam, maior será a viscosidade. Da composição química das partículas dependem em grande parte, a intensidade das forças interparticulares e intermoleculares.

Sabe-se que a viscosidade torna-se maior com o aumento da concentração de sólidos solúveis. Segundo Schliephake (1963), este fato estaria ligado

a dois aspectos interdependentes. O primeiro diz respeito à redução de fluidos para a “lubrificação” inter-molecular, de tal forma que o atrito aumenta. O segundo aspecto relaciona-se com a forma de hidratos pelos íons e moléculas em altas concentrações. O solvente não é mais suficiente para saturar todas as moléculas, e essas começam a formar agregados. Esses dois aspectos se somam, introduzindo um rápido aumento da viscosidade, observado nas soluções.

Vitali (1981), em revisão de literatura e em Rao et al. (1981), verificaram a existência de duas equações matemáticas que representam a dependência da viscosidade aparente com o teor de sólidos solúveis. São elas:

$$\eta_a = \eta_a C^{a_1} \quad (6)$$

onde:

C = concentração de sólidos solúveis em ° Brix

η_a e a_1 = parâmetros da equação

Genotelle (1978), descreveu a dependência da viscosidade aparente com a concentração de sacarose, na faixa de 0 a 85° Brix pela equação:

$$\eta_a = \eta_a'' \exp(b_1 N) \quad (7)$$

onde:

N = concentração molar de sólidos solúveis.

n_a'' e b_1 = parâmetros da equação

Entre as características da fase dispersante cabe destacar: a viscosidade, a composição química, a polaridade, o pH e a concentração de eletrólitos (se for meio polar). A influência da viscosidade da fase dispersante no comportamento durante o fluxo dos sistemas dispersos, é o único ponto onde existe um acordo entre os pesquisadores. Todos os trabalhos apresentados neste campo, afirmam que existe entre ambos uma proporcionalidade direta. A composição química, a polaridade e o pH, influem nas forças interparticulares e a concentração de eletrólitos (quando a fase dispersante é polar) incidem na carga superficial das partículas e portanto, na força das ligações que configuram a estrutura do sistema e, conseqüentemente aumentando a viscosidade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Matéria prima e obtenção da polpa

A manga utilizada neste trabalho é de variedade Keitt e foi selecionada de um único lote proveniente da região sul de Minas Gerais. O teste de maturação foi realizado utilizando-se um texturômetro com objetivo de padronizar a maturação da fruta. No teste é fixada uma penetração de 5mm e verifica-se a força necessária para provocar esta penetração. Dentre as etapas de produção da polpa de manga, o estudo reológico é o de maior interesse nesta pesquisa.

Isto porque os equipamentos envolvidos no processamento como: bombas, trocadores de calor, sistemas de filtração e as próprias tubulações, tem que ser dimensionadas levando em consideração o comportamento reológico do material. Certamente as características organolépticas do produto também demandam o estudo do seu comportamento reológico, mas este não é o centro de interesse deste trabalho. O fluxograma para obtenção da polpa de manga utilizada neste trabalho está na Figura (3.1).

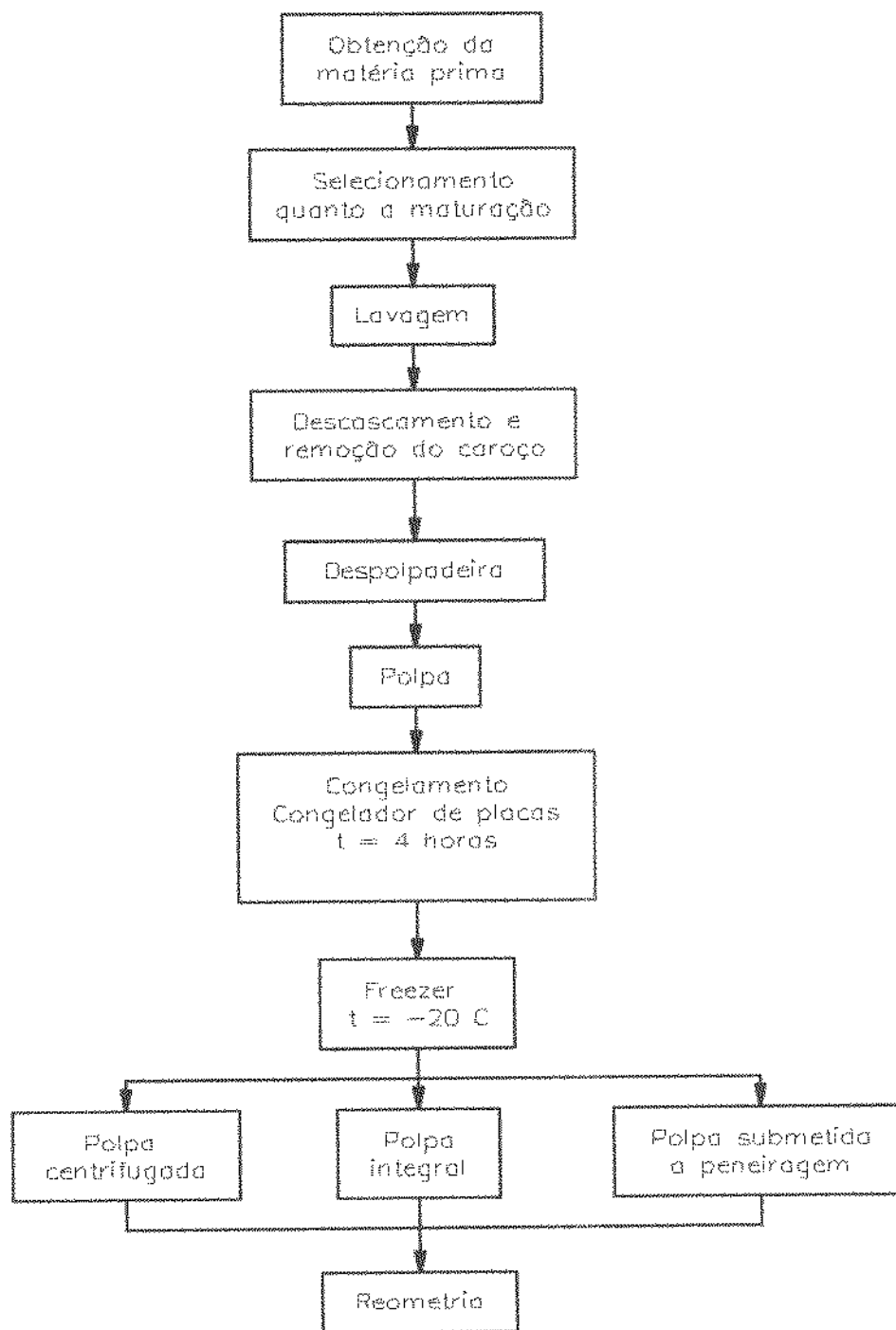


Figura 3.1 - Fluxograma para obtenção de polpa de manga

3.2 reômetro de cilindros concêntricos - obtenção de τ e γ

Considerando-se a geometria do reômetro, o torque em um dado ponto r é dado por:

$$T = 2\pi r h \tau \quad (3.1)$$

onde:

r = raio interno do cilindro

h = altura do cilindro

τ = tensão de cisalhamento

Portanto, a tensão de cisalhamento na parede do cilindro interno é dada por:

$$\tau_B = \frac{T}{2\pi R_B^2 h} \quad (3.2)$$

onde:

T = torque

R_B = raio interno do cilindro

h = altura do cilindro interno

τ = tensão de cisalhamento

A velocidade angular é dada por:

$$\Omega = \frac{V}{r} \quad (3.3)$$

onde:

V = velocidade linear

r = raio interno do cilindro

Ω = velocidade angular

que também pode ser expressa da seguinte forma:

$$\Omega = \int_{\tau_B}^{\tau_C} \frac{\gamma}{2\tau} d\tau \quad (3.4)$$

onde:

τ_B = tensão de cisalhamento na parede do cilindro interno

τ_C = tensão de cisalhamento na parede do copo

Diferenciando-se a equação (3.4) em relação a τ_B , tem-se:

$$\frac{d\Omega}{d\tau_B} = \frac{1}{2\tau_B} [\gamma(\tau_B) - \gamma(\tau_C)] \quad (3.5)$$

Desenvolvendo a equação (3.5) em série de Euler-Maclaurin, Krieger & Elrod (1953) obtiveram a seguinte expressão:

$$\gamma = \frac{\Omega}{\ln \varepsilon} \left(1 + \ln \varepsilon \frac{d \ln \Omega}{d \ln \tau_B} + \left[\frac{(\ln \varepsilon)^2}{3\Omega} \frac{d^2 \Omega}{d(\ln \tau_B)^2} \right] - \left| \frac{(\ln \varepsilon)^4}{45\Omega} \frac{d^4 \Omega}{d(\ln \tau_B)^4} \right| + \dots \right) \quad (3.6)$$

Onde:

$$\varepsilon = \frac{R_C}{R_B} \quad (3.7)$$

R_C = raio do copo

R_B = raio do cilindro interno

Elaborando-se um gráfico de Ω em função de τ_B em coordenadas logarítmicas, a inclinação da curva obtida é dada por:

$$M = \frac{d \ln \Omega}{d \ln \tau_B} \quad (3.8)$$

Segundo Krieger & Elrod (1953), quando o termo ($M \ln \varepsilon$) for menor que 0,2 a taxa de deformação poderá ser calculada pela expressão simplificada:

$$\gamma = \frac{\Omega}{\ln \varepsilon} (1 + M \ln \varepsilon) \quad (3.9)$$

Ainda segundo estes autores, quando o termo $(M \ln \varepsilon)$ situa-se entre 0,2 e 1,0, a taxa de deformação pode ser calculada através de:

$$\gamma = \left[\frac{\Omega}{\ln \varepsilon} \right] \left[1 + M \ln \varepsilon \frac{(\ln^2 \varepsilon)}{3} + \frac{(\ln^2 \varepsilon)}{3} \frac{dM}{d \ln \tau_B} \right] \quad (3.10)$$

A construção das curvas reológicas à partir dos dados obtidos no reômetro segue o seguinte procedimento:

- 1) Obtém-se a medida de torque no equipamento a uma dada velocidade angular;
- 2) Converte-se o torque em tensão de cisalhamento na parede do cilindro interno, pela Equação (3.2)
- 3) Calcula-se o parâmetro M pela Equação (3.8)
- 4) Calcula-se os gradientes de velocidade (γ) corrigidos para o comportamento não-newtoniano através da Equação (3.9) ou (3.10).

É importante lembrar que o procedimento acima representa o desenvolvimento teórico em que se baseia o reômetro de cilindros concêntricos. Porém, os equipamentos comerciais já dispõem de constantes de operação com as quais são calculados τ e γ .

3.3 Reometria

Foi estudado o comportamento reológico da polpa de manga na temperatura de 30°C e sólidos solúveis correspondente a 16,9°Brix. As medidas reológicas foram feitas no reômetro Haake Rotovisco modelo RV - 20, com sistema de medida ZA 30 e no Contraves Rheomot 115 com sistema de medida MS-1075. A escolha desses equipamentos deveu-se à possibilidade de obter um controle eficiente da temperatura de ensaio uma vez que a quantidade da amostra é pequena, aproximadamente 10ml.

O reômetro Haak Rotovisco é conectado a um micro computador para controlar sua operação, registrando a cada 2,4s os dados de temperatura, tensão de cisalhamento e taxa de deformação. Os experimentos foram feitos em triplicata utilizando-se para cada repetição uma nova amostra, igual à anterior, para evitar possíveis efeito de tempo. O tempo de cada corrida foi de 4min, completando um total de 20 pontos, sendo 2min. para velocidade de rotação crescente e 2min. para a decrescente. Antes de iniciar-se a ocorrência, conforme recomendação do fabricante, a amostra era deixada em repouso por aproximadamente 1min. para garantia de temperatura. A Figura (3.2), apresenta o sistema de medidas do reômetro Haake Rotovisco utilizado neste trabalho.

Onde:

D_a = Diâmetro do copo

D_i = Diâmetro interno

L = Comprimento

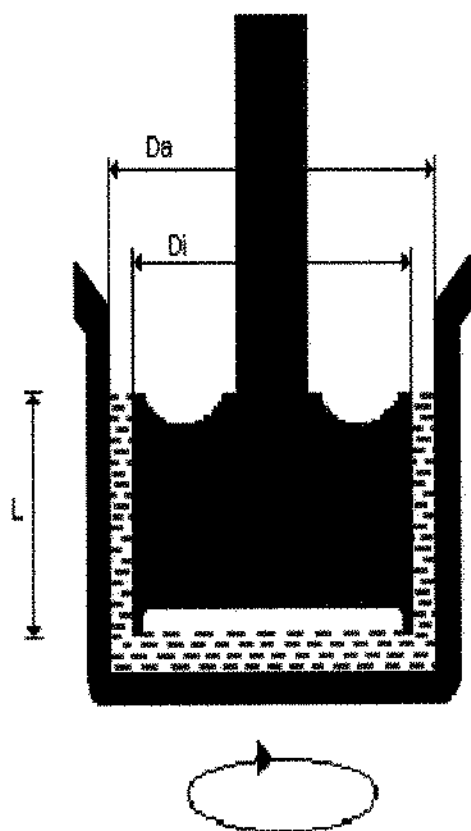


Figura 3.2 Sistema ZA30 - Reômetro Haake Rotovisco

No reômetro Contraves Rheomat 115 de cilindros concêntricos foi utilizado o sistema de medidas MS - 1075. Este cilindro é de anular fixo e casca cilíndrica rotativa ("double gap") de copo invertido com faixa de taxa de deformação de 25 a 3600s^{-1} . Conforme mostrada na Figura (3.3).

Nas medidas experimentais foi adicionado 10ml da amostra no copo, a seguir inserido a casca rotativa, conforme recomendação do fabricante. Foi deixado aproximadamente 10min. em rotação, tempo necessário para que a temperatura desejada fosse atingida. O reômetro tem uma camisa termostatizada ao redor do cilindro externo onde circula água com temperatura controlada. As medidas foram feitas variando-se a velocidade de rotação de forma crescente e decrescente. Os experimentos foram feitos em triplicata, e para cada repetição foi usada uma nova amostra igual à anterior. O tempo de cada corrida foi 1min.

Nestes experimentos, os valores de leitura de torque foram multiplicados por um fator (65,64) de transformação característico do aparelho e do sistema de copos empregado, fornecendo assim os valores da tensão de cisalhamento (τ). Os valores da taxa de deformação ($\dot{\gamma}$), são fornecidos pelo fabricante em função da escala de velocidade para fluidos de comportamento newtoniano. Não foi necessário correção de ($\dot{\gamma}$), devido à distância entre os cilindros ser muito pequena e portanto o desvio pode ser considerado desprezível.

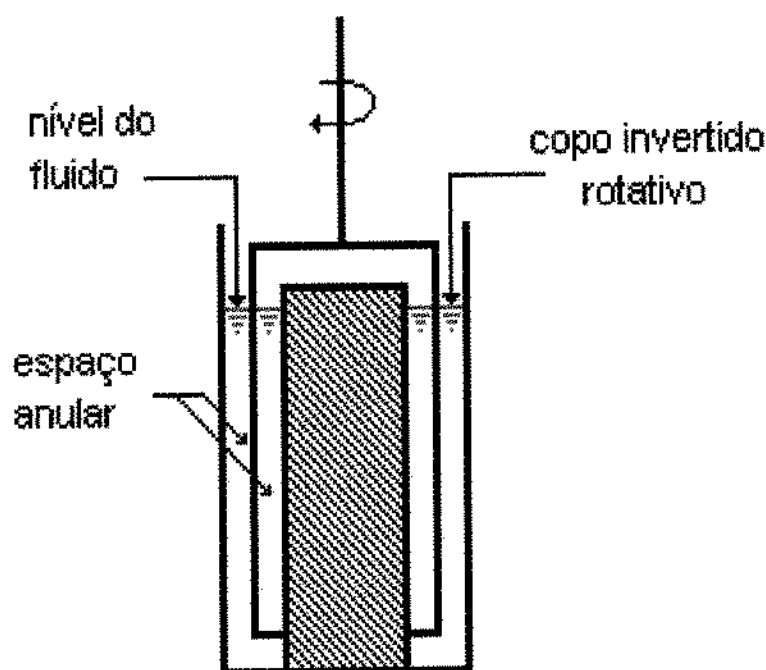


Figura 3.3-Sistema MS-DIN 1075 - Reômetro Contraves Rheomat

Para ajuste das curvas foram utilizados os modelos reológicos de Casson, Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), Mizrahi-Berk e Herschel-Bulkley sendo que os 3 últimos têm τ_0 e foi feito pelo programa gráfico ORIGIN versão 3.5. Os parâmetros das equações de Casson, Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), Mizrahi-Berk e Herschel-Bulkley foram obtidos e analisados. Foram também analisados o coeficiente

de determinação (R^2), qui-quadrado (X^2), SSR (soma dos quadrados dos resíduos) e o coeficiente de correlação (R).

R^2 (coeficiente de determinação) - Mede a proporção da variação total da média explicada pela regressão, definido como a razão entre a soma quadrática total.

X^2 (qui-quadrado) - Expressa a diferença entre os valores previstos pelo modelo e os valores obtidos experimentalmente.

SSR (soma dos quadrados dos resíduos) - Identifica o erro no ajuste da curva.

R (coeficiente de correlação) - $\sqrt{R^2}$

4. RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1 Reômetro Haake Rotovisco modelo RV-20

Para análise dos dados experimentais, fez-se uso dos modelos de Ostwald-de-Waelle (Lei da Potência), Casson, Herschel-Bulkley e Mizrahi-Berk, devido ao fato de serem relativamente simples, de fácil aplicação prática e de larga utilização na área de sucos e polpas. Com o modelo de Casson tem-se uma estimativa do valor da tensão inicial a qual é geralmente utilizada para outros modelos.

No cálculo dos parâmetros dos modelos de Ostwald-de-Waelle (Lei da Potência), Casson, Herschel-Bulkley e Mizrahi-Berk, foram utilizados 20 pontos para cada amostra. Para esses modelos, através de um ajuste, o programa ORIGIN calculou os parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), soma dos quadrados dos resíduos (SSR), qui-quadrado (χ^2) e coeficiente correlação (R).

Foram realizadas 5 corridas com amostras diferentes do mesmo produto para os casos de produto “in natura” e peneirado em malha 0,149mm, sendo esses resultados apresentados nas Figuras (4.1 e 4.3). As Figuras (4.2 e 4.4), apresentam a média dos resultados dos reogramas obtidos experimentalmente para suco de manga “in natura” e peneirado em malha 0,149mm a ^{16,4°}16°Brix e temperatura de 30°C. Com as demais amostras foram realizadas apenas 3 repetições. Observa-se para todas as amostras que as curvas ascendentes e descendentes não coincidem, aparecendo uma possível histerese. Este fato é discutido por SCHRAMM (1994), como sendo consequência de um tempo insuficiente para a amostra atingir a temperatura desejada, o que também não permitiu uma ordenação das corridas experimentais. Fica evidente que apenas para as baixas taxas de deformação ocorre uma diferença marcante entre a curva ascendente e a descendente. Muito provavelmente isso se deve à acomodação das partículas suspensas. No entanto este trabalho tem como objetivo a descrição do

comportamento reológico para aplicação às operações industriais e nesses casos a taxa de deformação é sempre alta e apenas os casos de partida de equipamentos, principalmente de agitação e bombeamento apresentariam interesse nos baixos valores de $\dot{\gamma}$. Mas devido às baixas viscosidades aparentes, também nesses casos o interesse prático é pequeno.

Para os ajustes foram utilizadas as curvas ascendentes e descendentes, sendo tomado o valor médio da tensão de cisalhamento para uma dada taxa de deformação. Nos reogramas verifica-se que a leitura é confiável para $\dot{\gamma}$ a partir de 50s^{-1} , como pode ser observado nas Figuras (4.1 a 4.15).

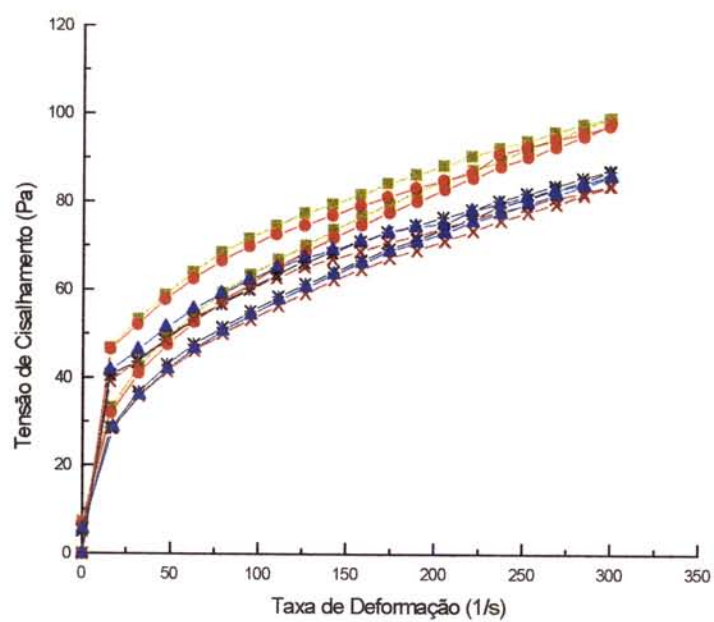


Figura 4.1 - Reograma do suco de manga “in natura” ($T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$), para 5 amostras do mesmo produto.

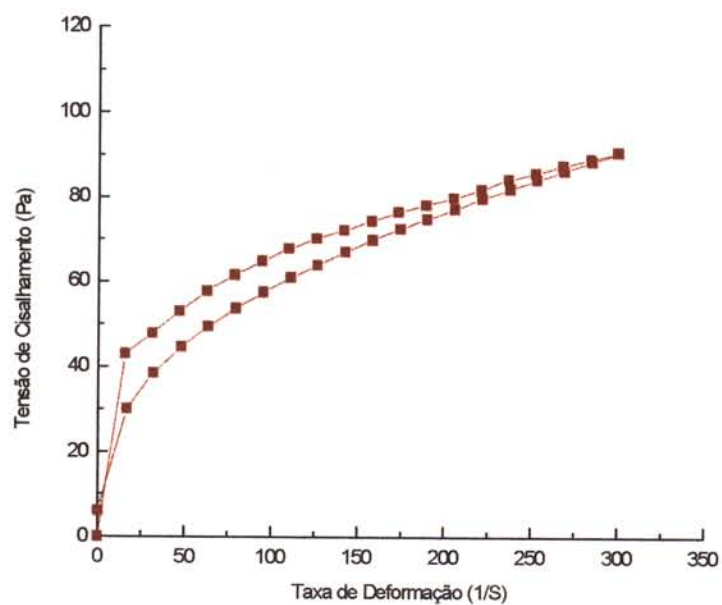


Figura 4.2 - Suco de manga “in natura” - média dos reogramas experimentais.
($T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$)

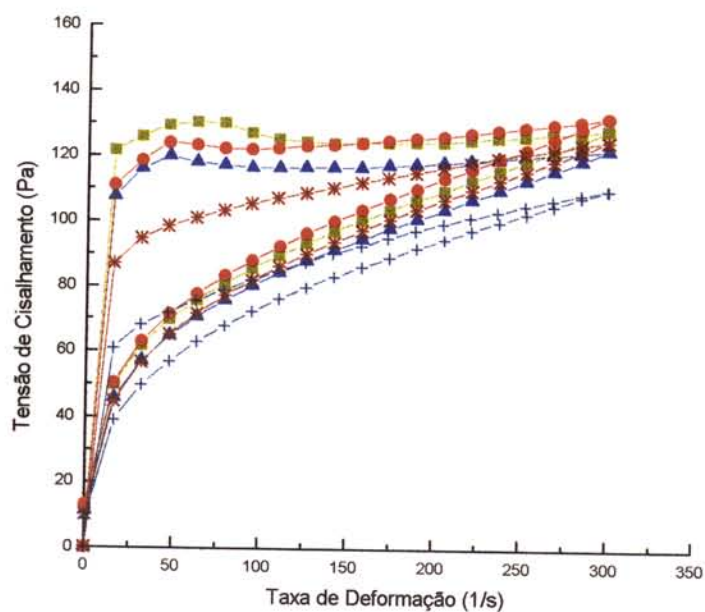


Figura 4.3 - Reograma do suco de manga filtrado em peneira (malha-0,149mm; $T=30^{\circ}\text{C}$ e $16,9^{\circ}\text{Brix}$), para 5 amostras do mesmo produto.

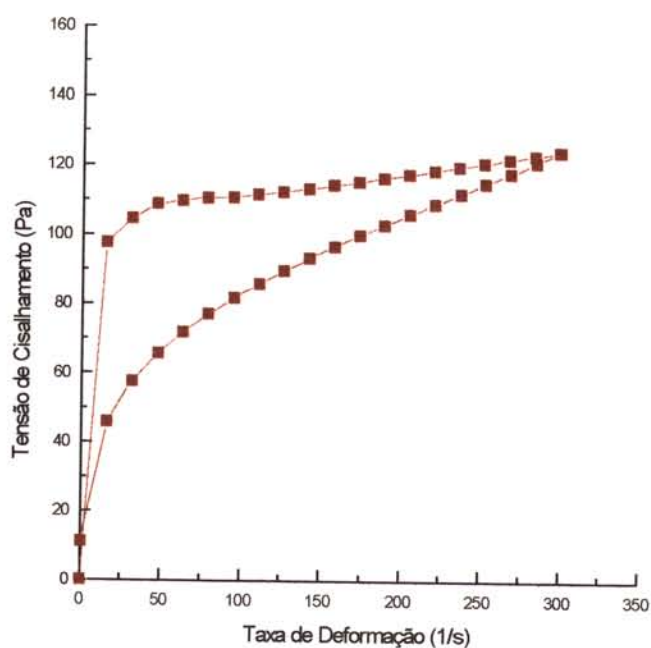


Figura 4.4 - Suco de manga filtrado em peneira - média dos reogramas experimentais (malha-0,149mm; $T=30^{\circ}\text{C}$ e $16,9^{\circ}\text{Brix}$)

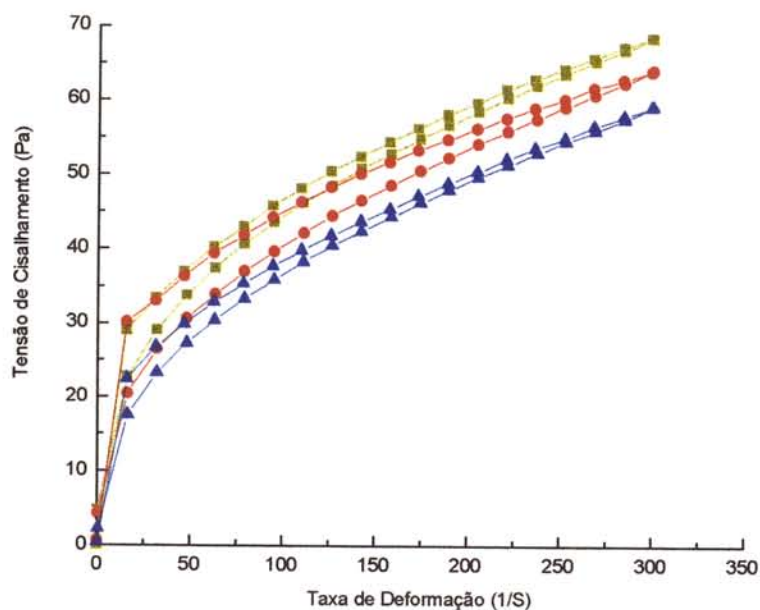


Figura 4.5 - Reograma do suco de manga filtrado em peneira (malha-0,59mm; T=30°C e 16,9°Brix), para 3 amostras do mesmo produto.

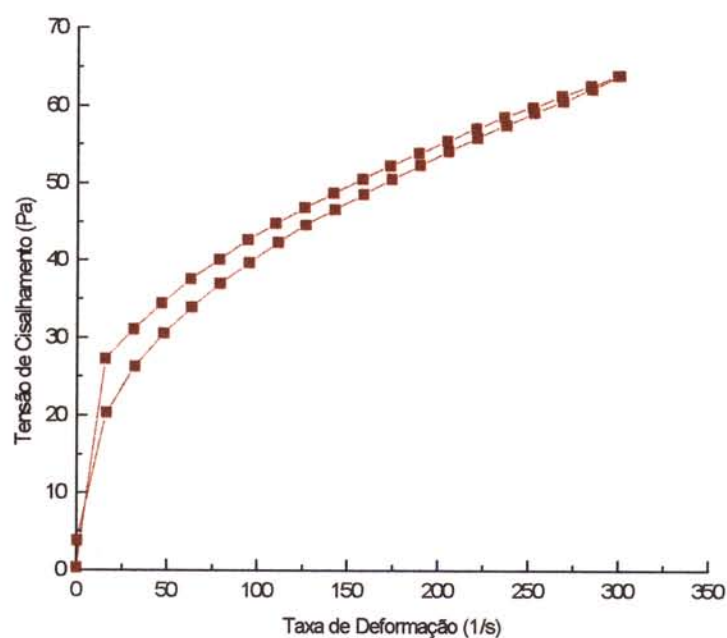


Figura 4.6 - Suco de manga filtrado em peneira - média dos reogramas experimentais (malha-0,59mm; T=30°C e 16,9°Brix).

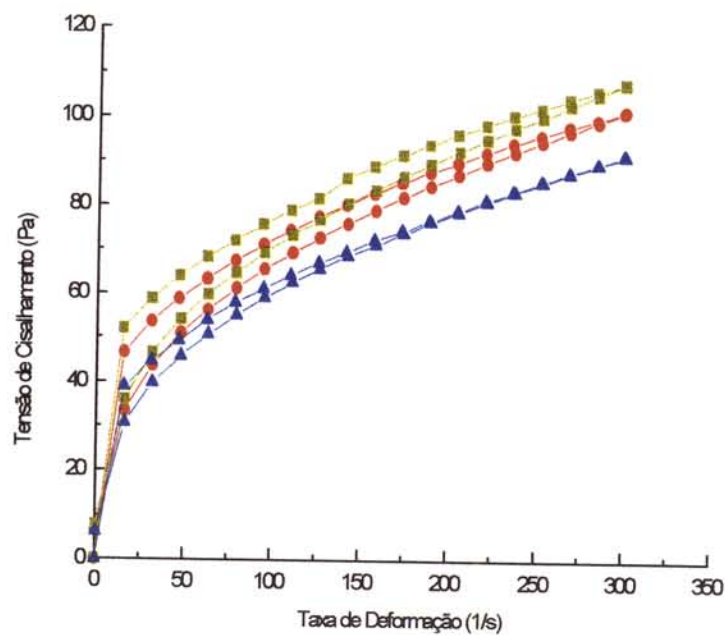


Figura 4.7 - Reograma do suco de manga filtrado em peneira (malha-0,84mm; $T=30^{\circ}\text{C}$ e $16,9^{\circ}\text{Brix}$), para 3 amostras do mesmo produto.

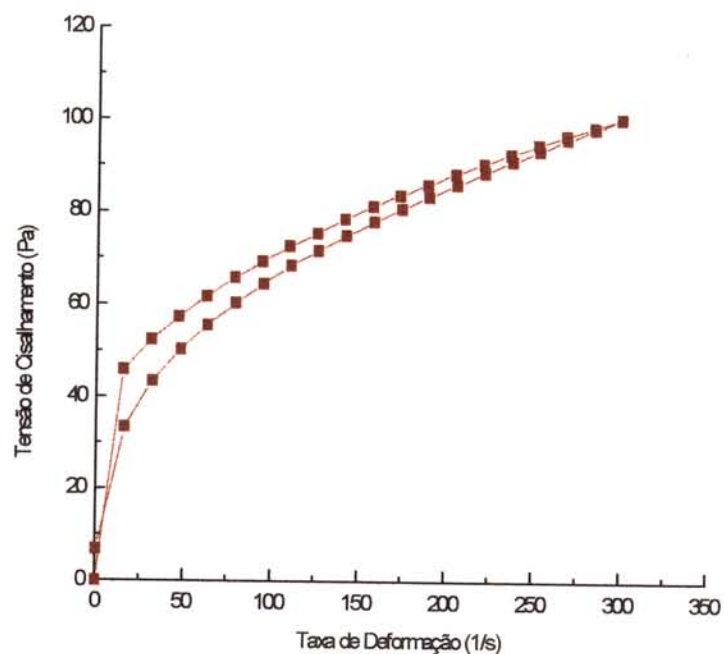


Figura 4.8 - Suco de manga filtrado em peneira - média dos reogramas experimentais (malha-0,84mm; $T=30^{\circ}\text{C}$ e $16,9^{\circ}\text{Brix}$).

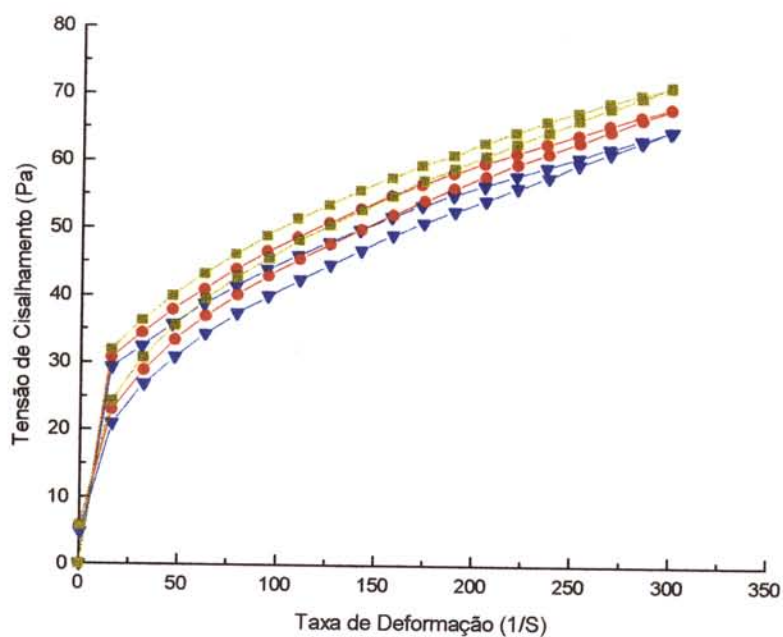


Figura 4.9 - Reograma do suco de manga filtrado em peneira (malha-1,18mm; $T=30^{\circ}\text{C}$ e $16,9^{\circ}\text{Brix}$), para 3 amostras do mesmo produto.

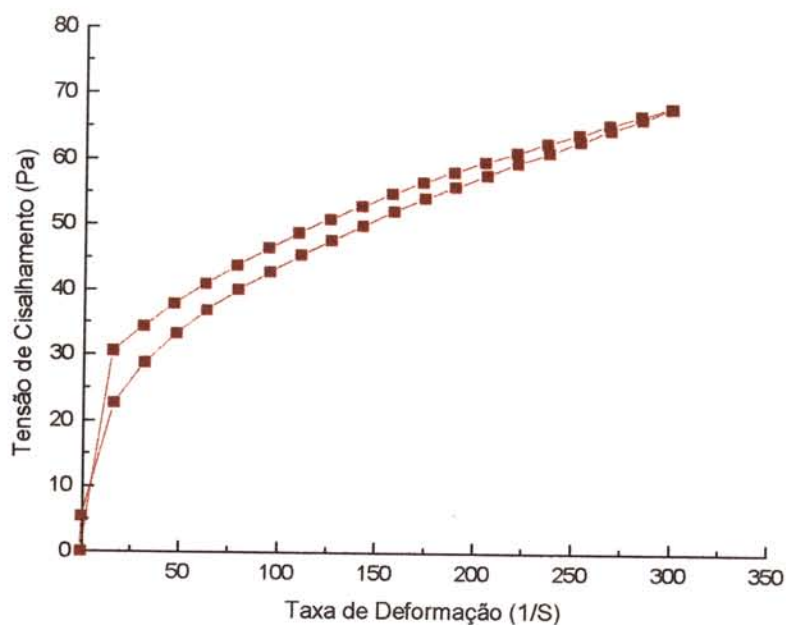


Figura 4.10 - Suco de manga filtrado em peneira - média dos reogramas experimentais (malha-1,18mm; $T=30^{\circ}\text{C}$ e $16,9^{\circ}\text{Brix}$)

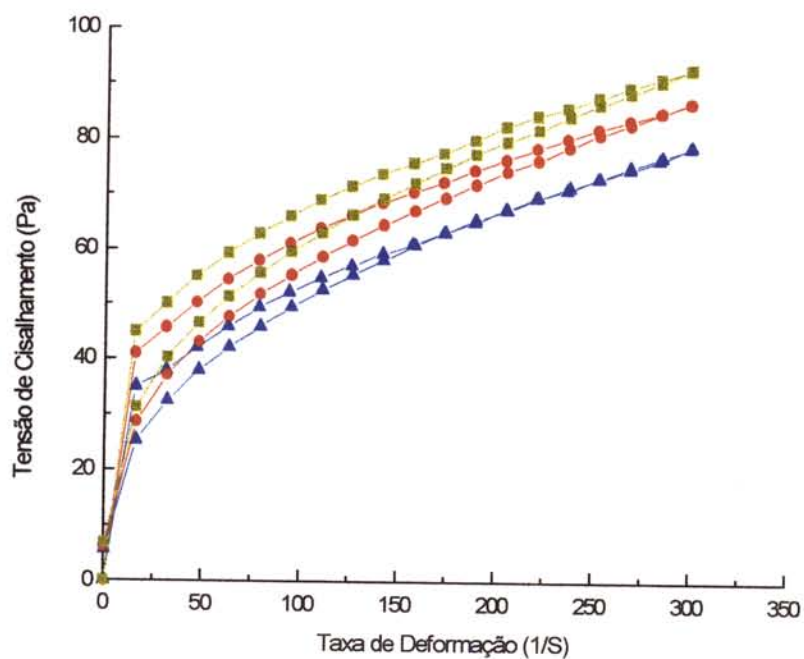


Figura 4.11 - Reograma do suco de manga “in natura” ($T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$), para 3 amostras do mesmo produto.

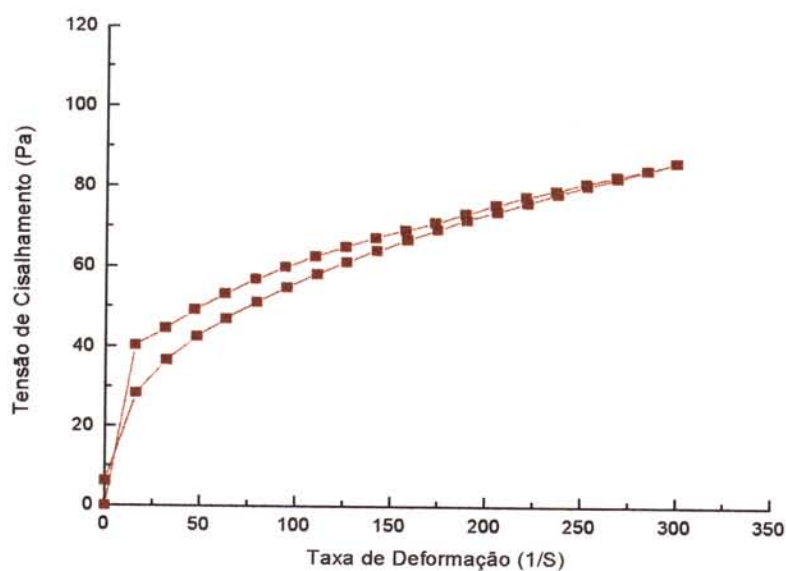


Figura 4.12 - Suco de manga “in natura” - média dos reogramas experimentais ($T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$).

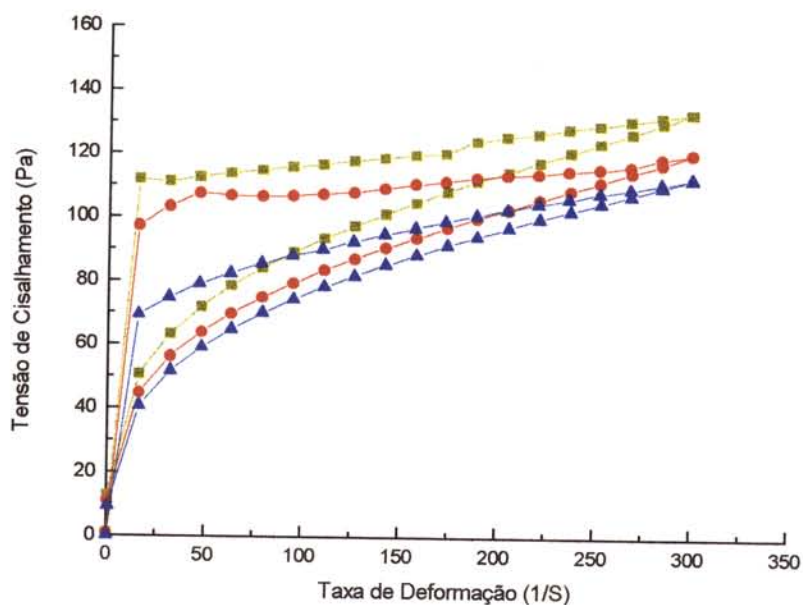


Figura 4.13 - Reograma do suco de manga filtrado em peneira (malha-0,149mm, $T=30^{\circ}$ e $16,9^{\circ}\text{Brix}$), para 3 amostras do mesmo produto.

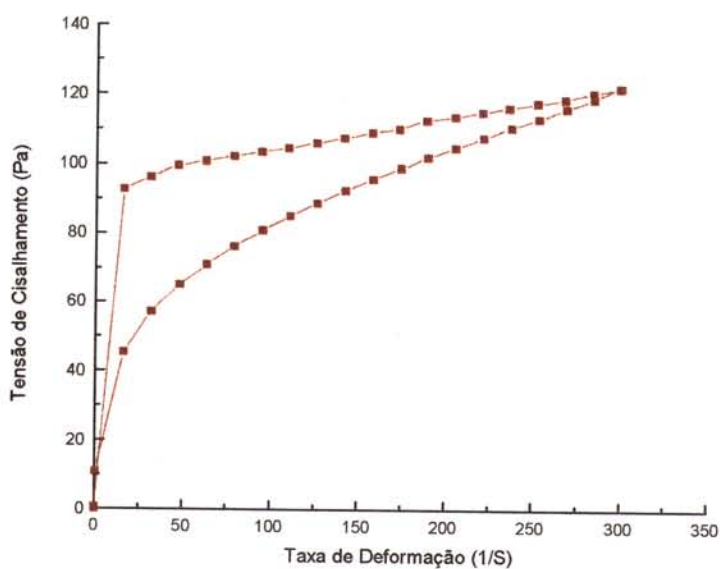


Figura 4.14 - Suco de manga filtrado em peneira - média dos reogramas experimentais (malha-0,149mm; $T=30^{\circ}\text{C}$ e $16,9^{\circ}\text{Brix}$).

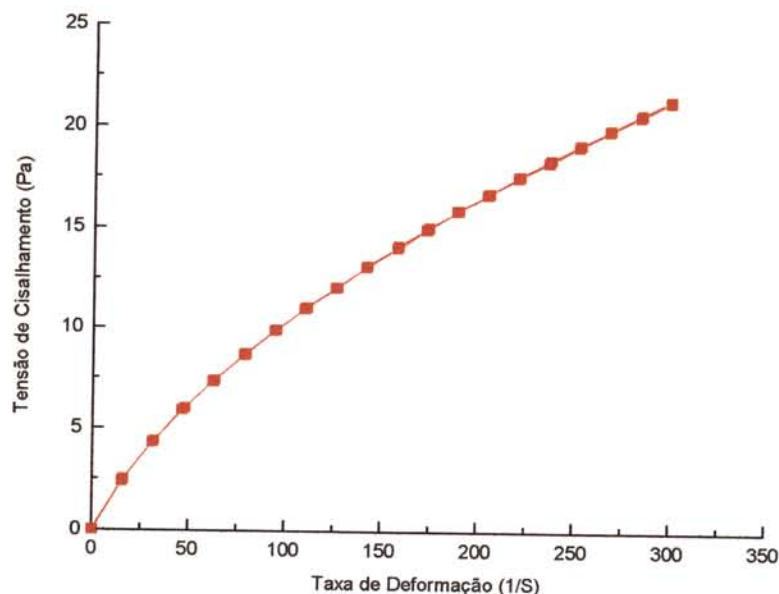


Figura 4.15 - Reograma do suco de manga centrifugado ($T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$).

4.1.1 Determinação dos Parâmetros Reológicos

Os dados obtidos para cada amostra a uma temperatura fixa de 30°C foram correlacionados através de quatros modelos reológicos: Ostwald-de-Waelle (Lei da Potência), modelo de Casson, modelo de Herschel-Bulkley e o modelo de Mizrahi-Berk.

Os parâmetros de cada modelo foram determinados utilizando-se o software ORIGIN versão 3.5, através de regressão não linear.

As Figuras (4.16, 4.17, 4.18 e 4.19) apresentam os reogramas experimentais para o suco de manga. Observa-se que todos os modelos reológicos

citados anteriormente se ajustam muito bem aos resultados experimentais, como pode ser verificado pelos parâmetros estatístico dos ajustes, nas Tabelas (4.1, 4.2, 4.3 e 4.4).

A decisão do modelo mais adequado foi tomada com base nos parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), qui-quadrado (X^2), soma dos quadrados dos resíduos (SSR) e coeficiente de correlação (R), o melhor ajuste foi analisado com base nos parâmetros R^2 (mede a proporção da variação total da média explicada pela regressão), definido como a razão entre a soma quadrática total, e pelo qui-quadrado (X^2) que expressa a diferença entre os valores previstos pelo modelo e os valores obtidos experimentalmente. O modelo adequado é aquele com valores de R^2 próximo de 1 (um) e valores de X^2 próximo de zero.

4.1.2 Modelo de Casson

O ajuste do modelo de Casson encontra-se na Tabela (4.1). Pode-se observar que os parâmetros K_o e K_c , não aumentaram com a redução da abertura da malha da peneira em relação ao suco “in natura”, para as malhas de 0,59mm e 1,18mm. Para as peneiras com malhas 0,149mm e 0,84mm o valor de K_o foi superior ao “in natura”. Já para o centrifugado este valor foi inferior a 1(um).

Verificou-se que o coeficiente de correlação (R) varia entre 0,995 a 0,998 para todas as amostras. As curvas com ajustes destas equações para as diferentes malhas de peneira “in natura” e centrifugado, encontram-se na Figura (4.16). A análise estatística de X^2 mostra valores próximos a zero e o R^2 próximo a 1(um), mostrando um bom ajuste da curva com o modelo proposto.

Analisando os resultados estatísticos para o modelo de Casson, verificou-se que os erros de (K_o e K_c), referentes aos parâmetros deste modelo são bem próximos de zero em todos os filtrados e centrifugados, conforme mostrados na Tabela (4.1).

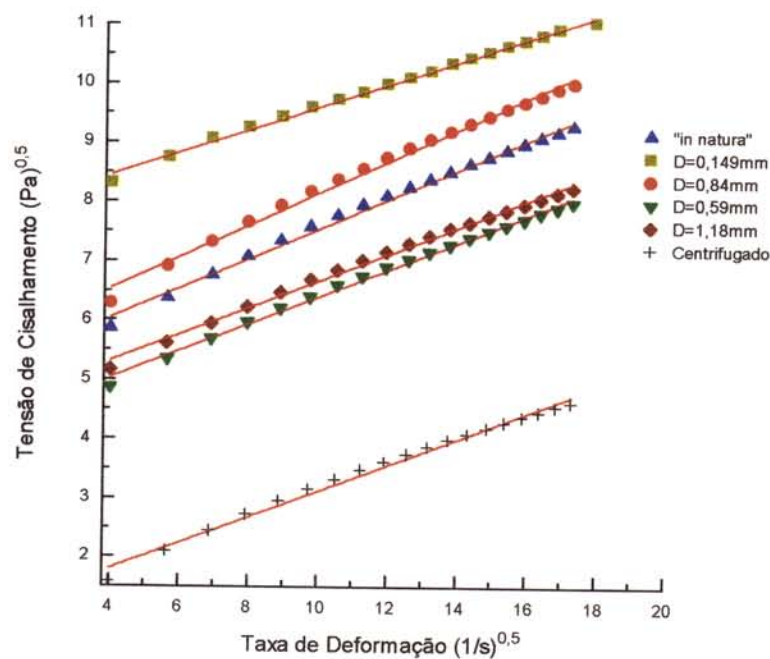


Figura 4.16 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação - ajuste pelo modelo de Casson. T=30°C, 16,9°Brix.

Tabela 4.1 - Parâmetros do modelo de Casson. T= 30°C, 16,9°Brix

Amostra	$K_0(\text{Pa})^{1/2}$	$K_c(\text{Pa} \cdot \text{s})^{1/2}$	Erro K_0	Erro K_c	X^2	R^2	SSR	CORR
"in natura"	5,260	0,252	0,070	0,006	0,009	0,992	0,149	0,996
D=1,18mm	4,415	0,226	0,047	0,003	0,004	0,995	0,069	0,998
D=0,84mm	5,467	0,269	0,068	0,005	0,008	0,993	0,144	0,996
D=0,59mm	4,127	0,228	0,048	0,004	0,004	0,995	0,072	0,998
D=0,149mm	7,665	0,195	0,033	0,003	0,002	0,997	0,032	0,998
Centrifugado	0,917	0,220	0,065	0,005	0,007	0,991	0,127	0,995

4.1.3 Modelo de Ostwald-de-Waele

O ajuste do modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), encontra-se na Figura (4.17). Pode-se observar que o parâmetro K , não aumentou com a redução da abertura da malha da peneira em relação ao suco “in natura”, exceto para a malha 0,84mm e 0,149mm. Já o parâmetro n_H (índice de comportamento do fluido), manteve-se constante em relação ao suco “in natura”, exceto no centrifugado e na malha 0,149mm.

Analisando o resultado estatístico para o modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), verificou-se que os erros de (n_H) referentes aos parâmetros deste modelo são bem próximo de zero para todos os filtrados, “in natura” e para o centrifugado. Já o erro de (K), mostrou-se aleatório em relação aos filtrados e centrifugado.

Os valores de X^2 nos filtrados, “in natura” e para o centrifugado, não foram elevados e o R^2 foi próximo a 1 (um), mostrando que o modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência) é um bom ajuste para estes casos. Na malha 0,149mm X^2 não foi próximo a zero e o R^2 não foi próximo a 1 (um), o ajuste do modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência) não é bom.

SARAVACOS (1970), utilizando um reômetro de cilindro concêntrico, reportou o efeito da temperatura na viscosidade de sucos e purês de frutas, dentre eles suco de laranja, usando a equação de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência) para descrever seu comportamento reológico. Os sucos de 44°Brix mostraram características pseudoplásticas, já os sucos mais diluídos foram newtonianos. Não foi encontrado na literatura nenhum trabalho sobre reologia de suco ou polpa de manga.

Na Figura (4.17), fica evidente as características pseudoplásticas do suco de manga à 30°C e 16,9 °Brix.

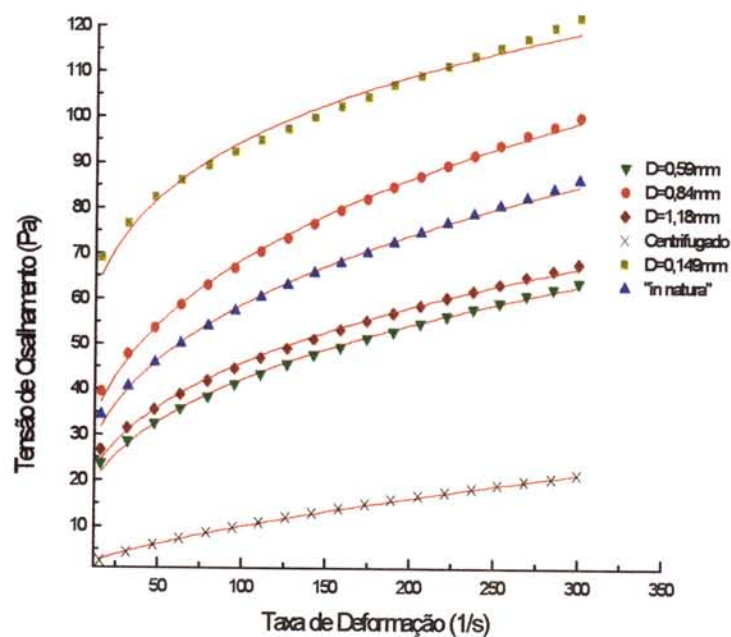


Figura 4.17 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação - ajuste pelo modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência). $T=30^{\circ}$, 16,9°Brix

Tabela 4.2 - Parâmetros do modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência)

Amostra	K	n_H	ErroK	Erron _H	X^2	R^2	SSR	CORR
"in natura"	12,684	0,334	0,3162	0,0048	0,6634	0,9973	11,2784	0,9986
D=1,18mm	9,511	0,342	0,2717	0,0055	0,5273	0,9966	8,9648	0,9983
D=0,84mm	14,882	0,333	0,3270	0,0042	0,7036	0,9979	11,9611	0,9979
D=0,59mm	8,087	0,360	0,2249	0,0053	0,4170	0,9986	7,0896	0,9986
D=0,149mm	37,081	0,204	1,2376	0,0066	3,5977	0,9852	61,1613	0,9926
Centrifugado	0,439	0,683	0,0149	0,0063	0,0290	0,9992	0,4932	0,9995

4.1.4 Modelo de Mizrahi-Berk

Os valores de K_{OM} , K_M , e n_M bem como a análise estatística da equação de Mizrahi-Berk, nos diversos filtrados e centrifugado, pode ser verificado pela Tabela (4.3) e Figura (4.18).

O parâmetro K_{OM} , elevado ao quadrado, é a tensão inicial para o produto escoar. Com a diminuição das malhas, ocorreu o aumento no parâmetro K_{OM} dos filtrados, com exceção da malha 0,59mm e centrifugado.

O índice de comportamento do fluido (n_M), mostrou-se em todos os filtrados e centrifugado, praticamente constante na faixa de $\pm 0,05$. Resultados semelhantes foram obtidos por RAO & COOLEY (1982), com concentrados de tomate na faixa de 6-36% de sólidos totais. Estes resultados estão de acordo com o modelo de Mizrahi-Berk, o qual foi desenvolvido para suspensões em meio pseudoplástico, com n_M menor que 0,5 e ao atingir o valor máximo o modelo de Mizrahi-Berk reduz-se a modelo de Casson. Na literatura não foi encontrado nenhum trabalho de ajuste do modelo de Mizrahi-Berk ao suco de manga.

MIZRAHI-BERK (1971), demonstrou o efeito da temperatura e concentração sobre os parâmetros reológicos. Mostrou que o aumento da concentração, resulta em um aumento do índice de comportamento do fluido. A temperatura tem somente um ligeiro efeito sobre K_{OM} , e sobre o parâmetro n_H , não há nenhum efeito. O parâmetro mais influenciado pela temperatura é o K_M .

Analizando os resultados estatísticos para o modelo de Mizrahi-Berk, verificamos que os erros de (K_{OM} , K_M e n_M), referentes aos parâmetros deste modelo são bem próximo de zero em todos filtrados e centrifugado, exceto no filtrado 0,149mm.

Os valores de X^2 , em todos os filtrados e no centrifugado, foram próximos a zero e o R^2 próximo a 1(um), mostrando um bom ajuste da curva com o

modelo proposto. O coeficiente de correlação (R), obtiveram elevados valores em todos os filtrados e centrifugado analisados, variando entre 0,997 a 1.

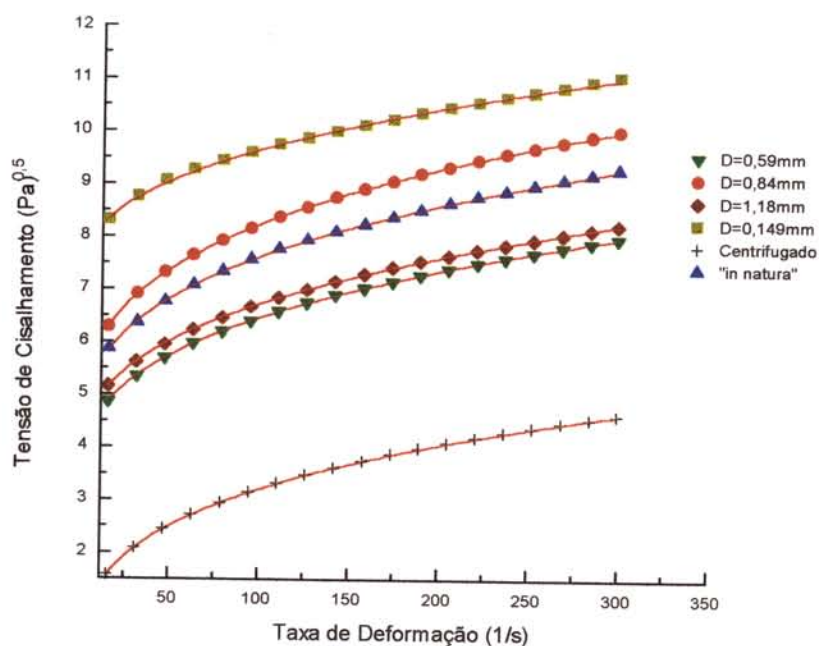


Figura 4.18 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação - ajuste pelo modelo de Mizrahi-Berk. T=30°C, 16,9°Brix

Tabela 4.3 - Parâmetros do modelo de Mizrahi-Berk. T=30°C, 16,9°Brix

Amostras	$K_{OM}(\text{Pa})$	$K_M(\text{Pa} \cdot \text{s}^n)^{1/2}$	n_M	Erro K_{OM}	Erro K_M	Erro n_M	X^2	R^2	SSR	CORR
"in natura"	3,137	1,365	0,270	0,175	0,116	0,010	0,0003	0,999	0,005	0,999
D=1,18mm	3,203	0,796	0,324	0,059	0,034	0,005	0,0001	0,999	0,001	0,999
D=0,84mm	3,459	1,289	0,285	0,029	0,018	0,002	0,0001	0,999	0,001	1
D=0,59mm	2,860	0,828	0,319	0,034	0,019	0,003	0,0002	0,999	0,001	0,999
D=0,149mm	6,839	0,737	0,306	0,404	0,243	0,042	0,0027	0,995	0,043	0,997
Centrifugado	-1,204	1,374	0,254	0,049	0,033	0,003	0,0001	0,999	0,001	0,999

4.1.5 Modelo de Herschel-Bulkley

No modelo de Herschel-Bulkley, pode ser observado conforme Tabela (4.4) e Figura (4.19), a presença de tensão inicial para suco de manga filtrado, “in natura” e centrifugado a temperatura 30°C.

Observa-se que o parâmetro, K_H (índice de consistência) aumentou para o filtrado em malha 0,84mm. Já nos filtrados em malha 1,18mm, 0,59mm, 0,149mm e no centrifugado houve uma diminuição no K_H . No índice de comportamento do fluido (n_H), mostrou-se em todos os filtrados e centrifugados praticamente constante na faixa de $(0,293 \pm 13\%)$. Para o parâmetro τ_{OH} diminuiu para todos os filtrados e o centrifugado, exceto para os filtrados de malha 0,84mm e 0,149mm. Analisando os resultados estatísticos para o modelo de Herschel-Bulkley, verificou-se que o erro de (n_H), referente ao parâmetro deste modelo são bem próximo a zero em todos os filtrados e centrifugados. Já os erros de (τ_{OH} e K_H), apresentou baixos valores, exceto no filtrado em peneira de malha 0,149mm.

Os valores de X^2 nas amostras analisadas estão todos próximos a zero e o valor de R^2 próximo a 1(um), com exceção do filtrado 0,149mm, onde o valor de X^2 foi de 0,3933, não apresentando significância, e pode-se dizer que nestes filtrados houve um bom ajuste dos dados à curva.

O coeficiente de correlação (R) em todos os filtrados e no centrifugado foi superior a 0,999. Isto demonstra exatamente que os pontos se afastam pouco do modelo de Herschel-Bulkley.

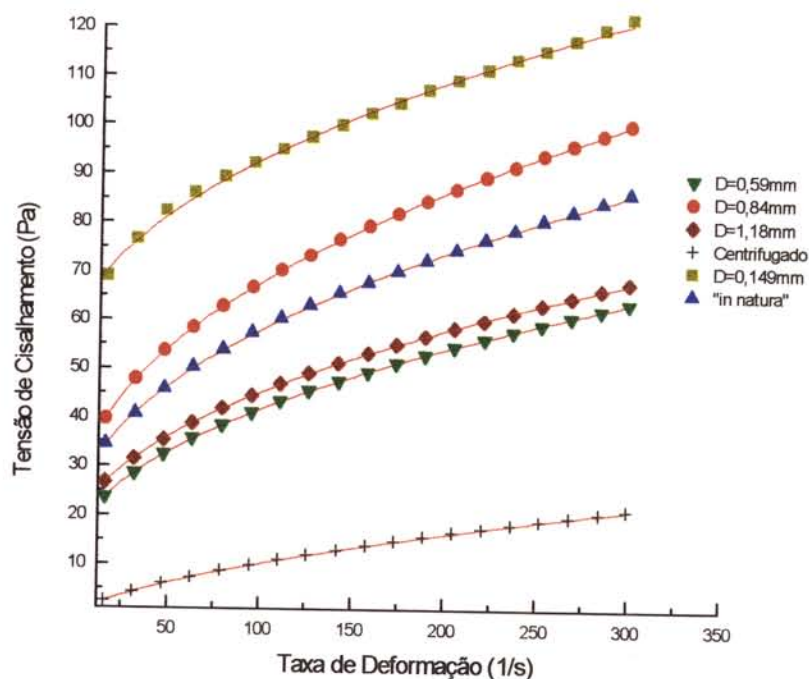


Figura 4.19 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação - ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley. T=30°C, 16,9°Brix.

Tabela 4.4 - parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley. T=30°C, 16,9°Brix.

Amostra	$\tau_{0H}(\text{Pa})$	$K_H(\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$	n_H	Erro τ_{0H}	Erro K_H	Erro n_H	X^2	R^2	SSR	CORR
"in natura"	16,27	4,99	0,46	0,6173	0,2320	0,0067	0,0282	0,9998	0,4524	0,9999
D=1,18mm	13,62	3,36	0,49	0,2986	0,1032	0,0045	0,0080	0,9999	0,1284	0,9999
D=0,84mm	17,57	6,42	0,45	0,3053	0,1203	0,0027	0,0062	0,9999	0,0993	0,9999
D=0,59mm	11,50	3,11	0,50	0,2036	0,0687	0,0033	0,0039	0,9999	0,0624	0,9999
D=0,149mm	55,02	3,76	0,50	1,9898	0,6546	0,0257	0,3933	0,9984	6,2922	0,9992
Centrifugado	-1,45	0,72	0,60	0,0727	0,0166	0,0036	0,0010	0,9999	0,0158	0,9999

4.2 REÔMETRO CONTRAVES RHEOMAT 115

No cálculo dos parâmetros dos modelos de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), Casson, Herschel-Bulkley e Mizrahi-Berk, foram utilizados 9 pontos no filtrado e 10 pontos no “in natura” e centrifugado.

As Figuras (4.20, 4.21, 4.22 e 4.23), apresentam os resultados dos ajustes obtidos experimentalmente para suco de manga integral à 16,9°Brix e temperatura de 30°C. Foram realizadas 3 repetições para estas amostras. Para esses modelos, através de um ajuste o programa ORIGIN calculou os parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), soma dos quadrados dos resíduos (SSR), qui-quadrado (X^2) e coeficiente de correlação (R), conforme mostrados nas Tabelas (4.5, 4.6, 4.7 e 4.8).

4.2.1 Modelo de Casson

O ajuste do modelo de Casson encontra-se na Tabela (4.5), pode-se observar que o parâmetro K_0 , aumentou com a redução da malha da peneira em relação ao suco “in natura”, para as malhas 1,18mm, 0,59mm e 0,149mm. Para a peneira com malha 0,84mm e o centrifugado foi inferior ao “in natura”. Já no parâmetro K_c estes valores foram superiores ao “in natura”.

Verificou-se que o coeficiente de correlação variou entre 0,970 à 0,992 para todas as amostras. As curvas com ajustes destas equações para diferentes malhas de peneiras, “in natura” e centrifugado, encontram-se na Figura (4.20). A análise estatística de X^2 mostra valores próximos a zero e o R^2 não próximo a 1 (um), não mostrando um bom ajuste da curva com o modelo proposto. Na peneira de malha 0,84mm X^2 foi próximo a zero e R^2 próximo a 1(um), o ajuste de Casson é bom.

Analisando os resultados estatísticos para o modelo de Casson, verificou-se que os erros de (K_o e K_c), referente aos parâmetros deste modelo são próximos a zero em todos os filtrados, “in natura” e centrifugado, conforme mostrados na Tabela (4.5).

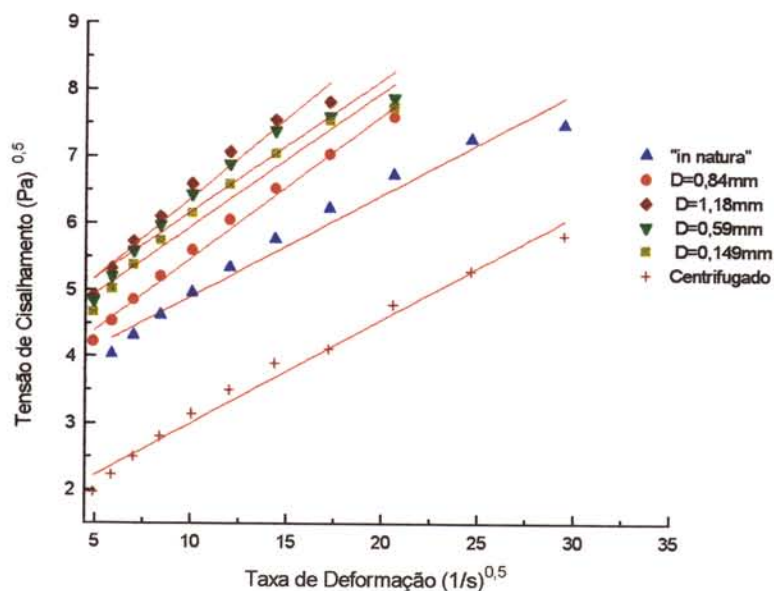


Figura 4.20 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação - ajuste pelo modelo de Casson. $T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$.

Tabela 4.5 - Parâmetros do modelo de Casson. $T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$

Amostra	$K_o(\text{Pa})^{1/2}$	$K_c(\text{Pa}\cdot\text{s})^{1/2}$	Erro K_o	Erro K_c	χ^2	R^2	SSR	CORR
“in natura”	3,39	0,15	0,157	0,009	0,0497	0,9707	0,3977	0,9852
D=1,18mm	3,99	0,24	0,0197	0,018	0,0436	0,9661	0,2621	0,9829
D=0,84mm	3,34	0,22	0,097	0,008	0,0145	0,9905	0,1016	0,9952
D=0,59mm	4,21	0,20	0,229	0,019	0,0805	0,9411	0,5638	0,9701
D=0,149mm	3,95	0,20	0,182	0,015	0,0509	0,9632	0,3566	0,9814
Centrifugado	1,45	0,16	0,101	0,006	0,0258	0,9856	0,2326	0,9928

4.2.2 Modelo de Mizrahi-Berk

Os valores de K_{OM} , K_M e n_M bem como a análise estatística da equação de Mizrahi-Berk, nos diversos filtrados e no centrifugado, pode ser verificado pela Tabela (4.6) e Figura (4.21). Com a diminuição das malhas o parâmetro K_{OM} dos filtrados, “in natura” e do centrifugado atingiu valores negativo, exceto no filtrado de malha 0,84mm.

O índice de comportamento do fluido (n_M), situou-se na faixa de 0,019 a 0,046 para todos os filtrados, exceto no filtrado de malha 0,84mm no centrifugado e no suco “in natura”. Analisando os resultados estatísticos para o modelo de Mizrahi-Berk, verificou-se que apesar da grande variação de (n_M) os erros referente a este parâmetro são bem próximos a zero em todos os filtrados, “in natura” e no centrifugado. Já os erros de (K_{OM} e K_M) apresentou elevados valores, exceto na peneira de malha 0,84mm e centrifugado.

Os valores de X^2 , em todos os filtrados e centrifugado foram próximo a zero e o R^2 próximo a 1(um), mostrando um bom ajuste da curva com o modelo proposto.

O coeficiente de correlação (R), obtiveram elevados valores em todos os filtrados e centrifugados analisados, variando entre 0,997 à 0,999.

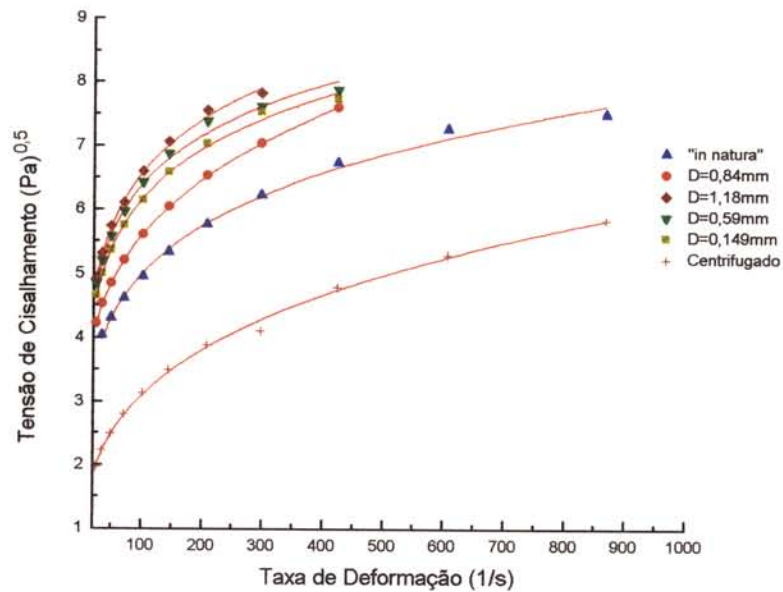


Figura 4.21 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação - ajuste pelo modelo Mizrahi-Berk. T=30°C, 16,9°Brix

Tabela 4.6 - Parâmetros do modelo de Mizrahi-Berk. T=30°C, 16,9°Brix

Amostra	$K_{OM}(\text{Pa})^{1/2}$	$K_M(\text{Pa}\cdot\text{s})^{1/2}$	n_M	Erro K_{OM}	Erro K^M	Erro n_M	X^2	R^2	SSR	CORR
"in natura"	-2,103	3,634	0,146	2,794	2,313	0,052	0,0076	0,996	0,0534	0,998
D=1,18mm	-34,289	35,702	0,029	88,274	87,603	0,063	0,0041	0,997	0,0204	0,998
D=0,84mm	1,032	1,433	0,252	0,110	0,074	0,006	0,0001	0,999	0,0004	0,999
D=0,59mm	-52,224	53,733	0,019	246,78	245,92	0,079	0,01	0,994	0,0604	0,997
D=0,149mm	-18,328	19,856	0,046	29,741	29,18	0,055	0,005	0,997	0,0297	0,998
Centrifugado	-0,453	1,059	0,263	0,504	0,313	0,033	0,004	0,998	0,0334	0,999

4.2.3 Modelo de Herschel-Bulkley

No modelo de Herschel-Bulkley, pode ser observado conforme Tabela (4.7) e Figura (4.22), a presença da tensão inicial para suco de manga “in natura”, filtrado e centrifugado à 30°C e 16,9°Brix.

O parâmetro τ_{OH} , atingiu valores negativos para suco “in natura” e para centrifugado com a diminuição da malha do filtrado, exceto para malha 0,84mm. Observa-se que o parâmetro K_H (índice de consistência), aumentou para os filtrados em malhas 1,18mm, 0,59mm e 0,149mm. Já no filtrado em malha 0,84mm e no centrifugado houve uma diminuição no K_H (índice de consistência). O índice de comportamento do fluido (n_H), mostrou-se aleatório em relação aos filtrados e centrifugado.

Analisando os resultados estatísticos para o modelo de Herschel-Bulkley, verificou-se que o erro de (n_H), referente ao parâmetro deste modelo são bem próximos a zero em todos os filtrados, “in natura” e centrifugado. Já os erros de (τ_{OH} e K_H), apresentou elevados valores, exceto na peneira de malha 0,84mm e centrifugado.

Os valores de X^2 em todos os filtrados e “in natura” foram elevados, mostrando que o modelo de Herschel-Bulkley não é o melhor ajuste para estes casos. No filtrado de malha 0,84mm e no centrifugado X^2 foi próximo a zero, o ajuste de Herschel-Bulkley é bom.

O coeficiente de correlação (R), em todos os filtrados e centrifugados obtiveram elevados valores, variando entre 0,996 à 0,999.

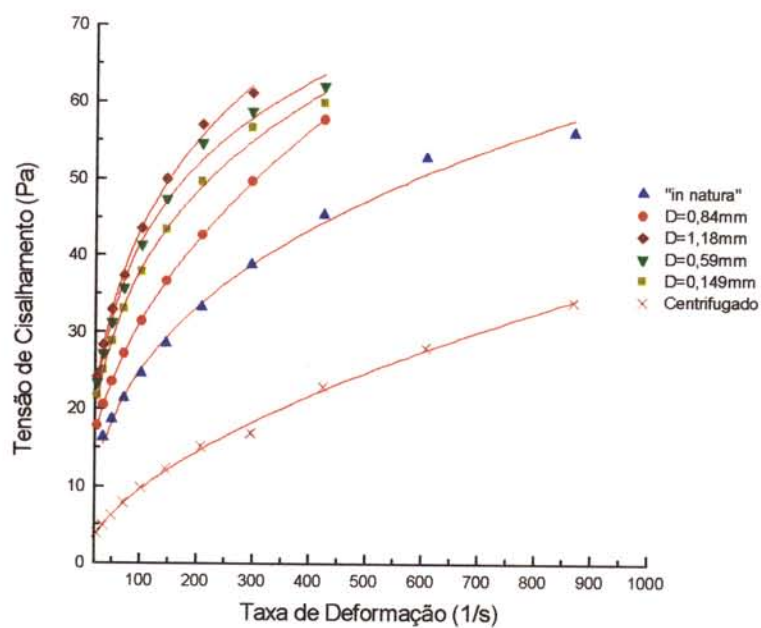


Figura 4.22 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação - ajuste pelo modelo Herschel-Bulkley. T=30°C, 16,9°Brix

Tabela 4.7 - Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley. T=30°C, 16,9°Brix

Amostra	$\tau_{OH}(\text{Pa})$	$K_H(\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$	n_H	Erro(τ_{OH})	Erro(K_H)	Erro(n_H)	χ^2	R^2	SSR	CORR
"in natura"	-8,718	8,016	0,313	8,500	4,379	0,063	1,437	0,994	10,057	0,997
D=1,18mm	-47,531	41,299	0,173	37,959	31,249	0,073	0,874	0,997	4,368	0,998
D=0,84mm	3,006	3,483	0,456	0,369	0,136	0,005	0,007	0,999	0,041	0,999
D=0,59mm	-141,039	127,539	0,078	193,045	183,320	0,082	1,789	0,993	10,738	0,996
D=0,149mm	-29,746	26,763	0,203	22,676	17,238	0,066	1,089	0,995	6,539	0,997
Centrifugado	-0,495	0,735	0,569	0,986	0,202	0,037	0,284	0,997	2,276	0,998

4.2.4 Modelo de Ostwald-de-Waele (lei da Potência)

O ajuste do modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), encontra-se na Figura (4.23). Pode-se observar que o parâmetro K , aumentou com a diminuição das malhas em relação ao suco “in natura”, exceto no centrifugado onde ocorreu uma diminuição. Já o parâmetro n_H (índice de comportamento do fluido), manteve-se constante em relação ao suco “in natura”.

Analisando os resultados estatísticos para o modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), verificou-se que o erro de (n_H), referente ao parâmetro deste modelo são bem próximo a zero para todos os filtrados, “in natura” e para o centrifugado. Já no erro de (K), obtiveram valores em todos os filtrados próximo a 1 (um), exceto no filtrado de malha 0,84mm e para o centrifugado.

Os valores de X^2 em todos os filtrados foram elevados, mostrando que o modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), não é o melhor para estes casos. Na peneira de malha 0,84mm e para o centrifugado X^2 foi próximo a zero e o R^2 próximo a 1 (um), o ajuste do modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência) é bom.

O coeficiente de correlação (R), obtiveram elevados valores em todos os filtrados e centrifugado analisados, variando entre 0,990 à 0,999, conforme mostrado na Tabela (4.8).

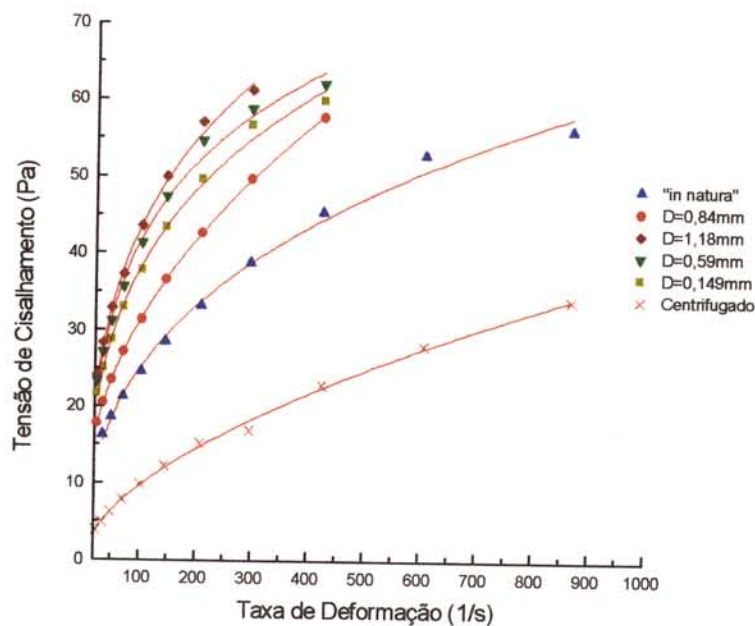


Figura 4.23 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação - ajuste pelo modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência). T=30°C, 16,9°Brix.

Tabela 4.8 - Parâmetros do modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência)
T=30°, 16,9°Brix

Amostra	K	n_H	Errro(K)	Erro (n_H)	X^2	R^2	SSR	CORR
"in natura"	4,090	0,393	0,308	0,012	1,569	0,993	12,555	0,996
D=1,18mm	7,931	0,365	0,572	0,014	1,790	0,991	10,744	0,995
D=0,84mm	4,663	0,415	0,070	0,003	0,059	0,999	0,417	0,999
D=0,59mm	8,673	0,334	0,835	0,018	4,194	0,981	29,359	0,990
D=0,149mm	7,369	0,353	0,501	0,012	1,777	0,991	12,445	0,995
Centrifugado	0,638	0,588	0,045	0,011	0,259	0,997	2,333	0,998

4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS USANDO-SE OS DOIS REÔMETROS

Os reogramas obtidos experimentalmente com o uso dos reômetros Haake Rotovisco modelo RV-20 e o Contraves Rheomat 115 foram ajustados com os modelos de Casson, Ostwald-de-waelle (Lei da Potência), Mizhari-Berk e Herschel-Bulkley para comparação. As Figuras (4,25²⁴ a 4,32³¹), apresentam estes resultados para suco de manga à 30°C e 16,9°Brix. Pode-se observar nessas figuras que não aconteceu concordância entre os ajustes obtidos a partir dos ensaios nos dois reômetros.

Os resultados obtidos no reômetro Haake Rotovisco, ajustado para o modelo de Casson, mostra que o parâmetro K_0 não aumentou com a redução da abertura da malha, exceto na malha 0,84mm e 0,149mm. Já para o reômetro Contraves Rheomat 115 o parâmetro K_0 , manteve-se praticamente constante, com exceção da malha 0,59mm e do centrifugado.

A análise estatística de X^2 mostrou valores próximos a zero e o R^2 próximo a 1(um), indicando um bom ajuste da curva com o modelo proposto, no caso do reômetro Haake Rotovisco. Já com o reômetro Contraves Rheomat 115 o X^2 mostrou valores próximos a zero e o R^2 não próximo a 1(um), indicando que o ajuste não é tão bom. Estes resultados são mostrados nas Tabelas (4.1 e 4.5).

Para o modelo de Mizrahi-Berk, utilizando-se o reômetro Haake Rotovisco, o parâmetro K_{OM} aumentou com a diminuição das malhas dos filtrados, com exceção da malha 0,59mm e centrifugado. Já para o reômetro Contraves Rheomat, com a diminuição das malhas o parâmetro K_{OM} dos filtrados, "in natura" e centrifugado atingiram valores negativos, com exceção do filtrado de malha 0,84mm.

Os valores de X^2 para os reômetros Haake Rotovisco e o Contraves Rheomat em todos os filtrados e centrifugados foram próximos de zero e o R^2 próximo

a 1(um), mostrando um bom ajuste da curva com o modelo proposto, como pode ser observado nas Tabelas (4.3 e 4.6).

Observa-se que o parâmetro τ_{OH} , utilizando-se o reômetro Haake Rotovisco, diminui para todos os filtrados e centrifugados, exceto para os filtrados de malha 0,84mm e 0,149mm. Já o parâmetro τ_{OH} , utilizando-se o reômetro Contraves Rheomat atingiu valores negativos para todos os filtrados e centrifugados, com exceção do filtrado de malha 0,84mm.

Os valores de X^2 para o reômetro Haake Rotovisco em todos os filtrados e centrifugados, apresentou valores próximos a zero e o R^2 próximo a 1(um). Pode-se dizer que nos filtrados e centrifugados houve um bom ajuste dos dados à curva. Já utilizando-se o reômetro Contraves Rheomat, os valores de X^2 em todos os filtrados, "in natura" e centrifugado foram elevados, mostrando que o modelo de Herschel-Bulkley não é o melhor ajuste para estes casos. com exceção do filtrado de malha 0,84mm e o centrifugado onde o X^2 foi próximo a zero e o R^2 próximo a 1(um). Estes resultados estão mostrados nas Tabelas (4.4 e 4.7).

Usando-se o reômetro Haake Rotovisco os valores de X^2 em todos os filtrados "in natura" e para o centrifugado não foram elevados, e o R^2 foi próximo a 1 (um), mostrando que o modelo de Ostwald-de-Waelle (Lei da Potência) é um bom ajuste, exceto no filtrado de malha 0,149mm. O mesmo aconteceu com o reômetro Contraves Rheomat, mostrando que os valores de X^2 em todos os filtrados foram elevados, pode-se dizer que o modelo de Ostwald-de-Waelle (Lei da Potência), não é o melhor ajuste, exceto no filtrado de malha 0,84mm e centrifugado onde X^2 apresentou valores próximos a zero e o R^2 próximo a 1(um), mostrando um bom ajuste para este modelo, como pode ser observado nas Tabelas (4.2 e 4.8).

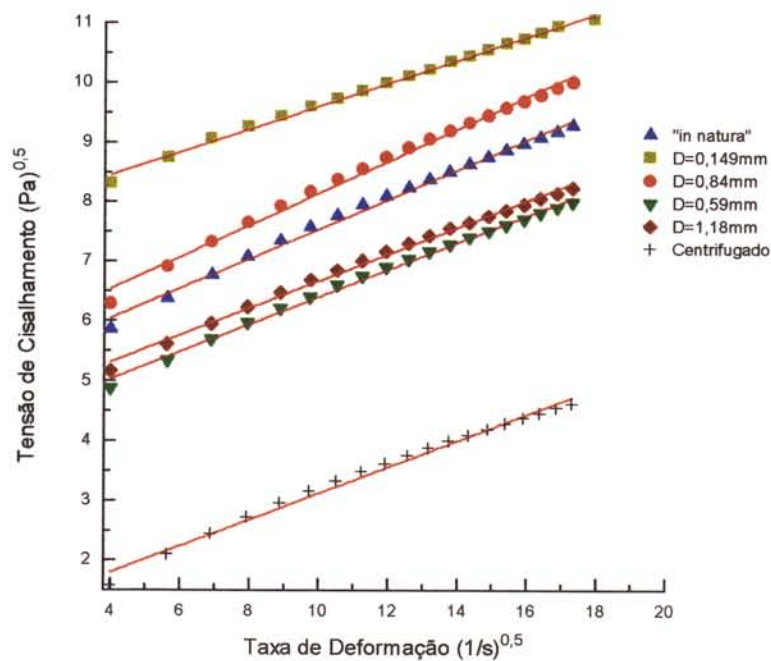


Figura 4.24 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação - ajuste pelo modelo de Casson. $T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$ - Reômetro Haake Rotovisco modelo RV-20

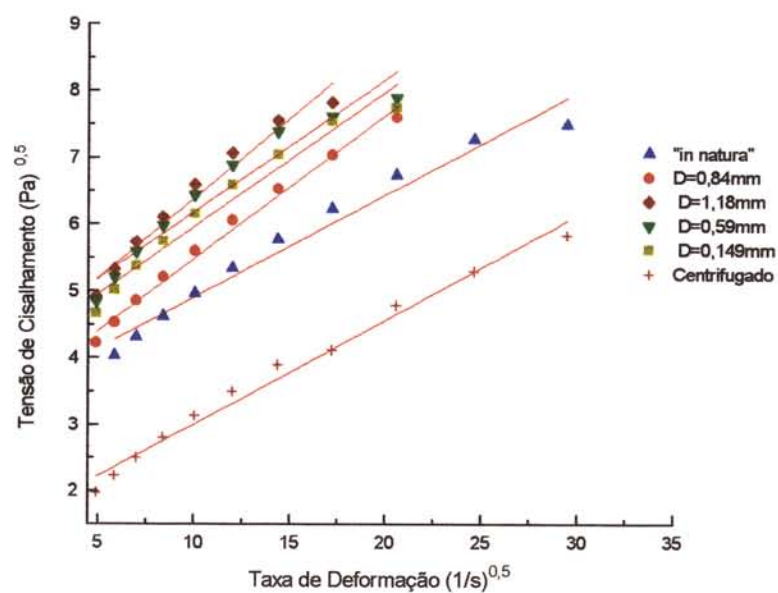


Figura 4.25 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação - ajuste pelo modelo de Casson. $T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$ - Reômetro Contraves Rheomat 115

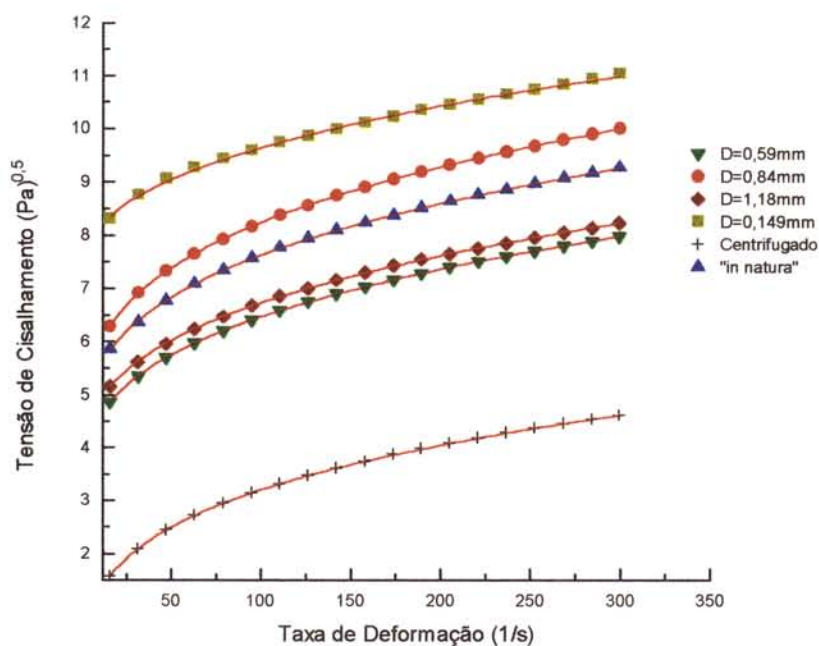


Figura 4.26 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação - ajuste pelo modelo de Mizrahi-Berk. $T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$ - Reômetro Haake Rotovisco modelo RV-20

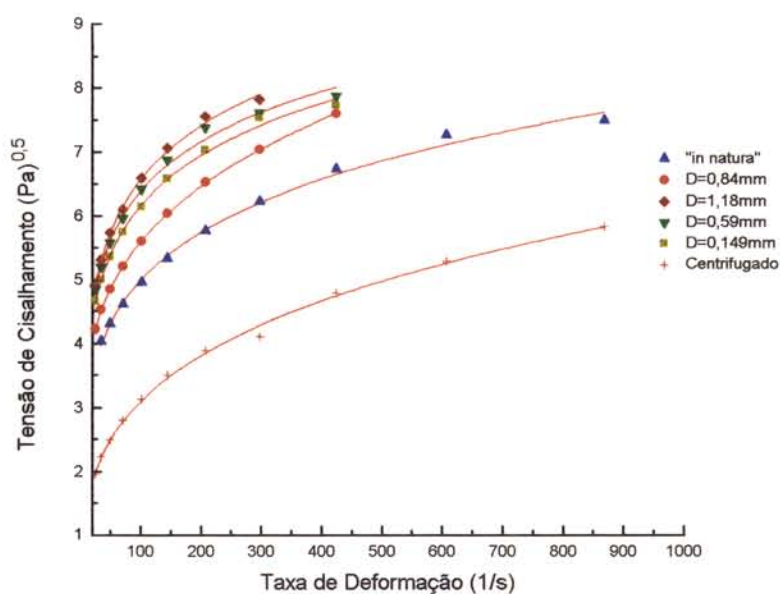


Figura 4.27- Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação - ajuste pelo modelo Mizrahi-Berk. $T=30^{\circ}\text{C}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$ - Reômetro Contraves Rheomat 115

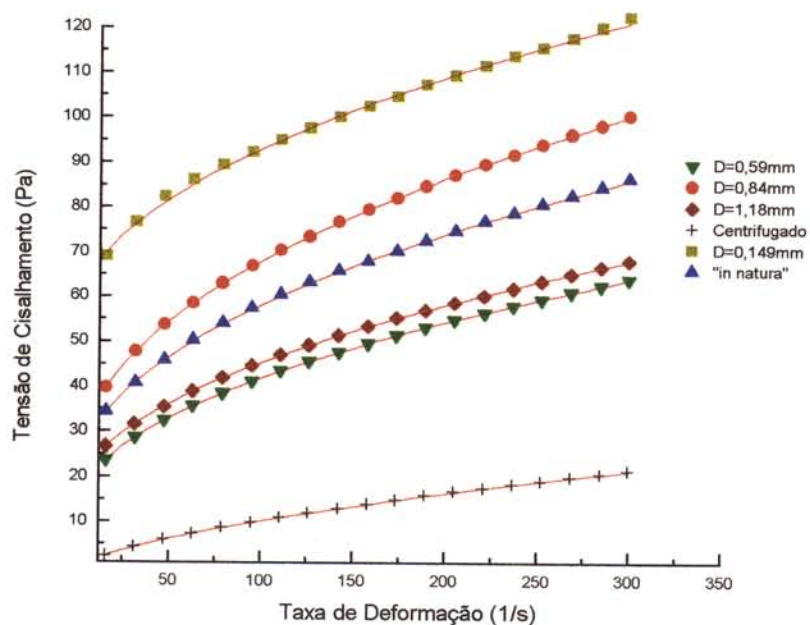


Figura 4.28 - Suco de manga-Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação-ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley. T=30°C, 16,9°Brix-Reômetro Haake Rotovisco modelo RV-20

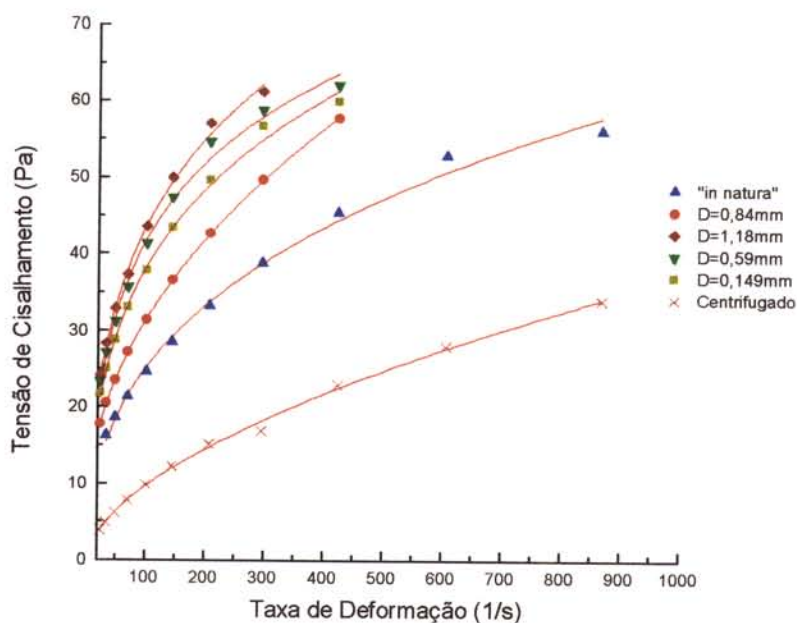


Figura 4.29 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação - ajuste pelo modelo Herschel-Bulkley. T=30°C, 16,9°Brix - Reômetro Contraves Rheomat 115

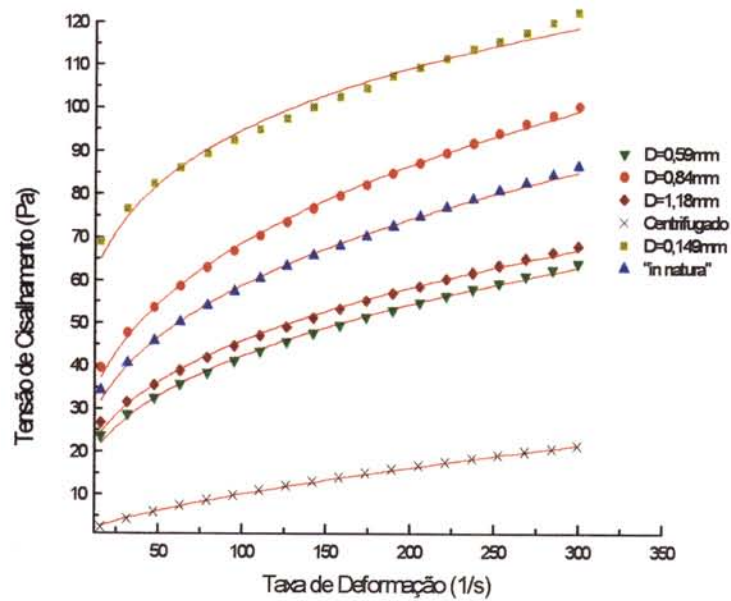


Figura 4.30 - Suco de manga-Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação-ajuste pelo modelo de Ostwald-de-Waelle (Lei da Potência). $T=30^{\circ}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$ -Reômetro Haake Rotovisco modelo RV-20

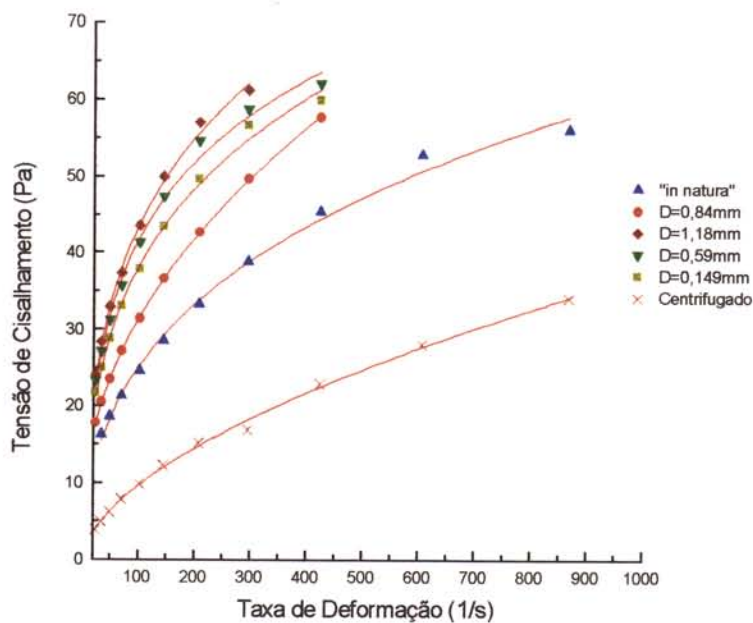


Figura 4.31 - Suco de manga - Tensão de Cisalhamento vs Taxa de Deformação - ajuste pelo modelo de Ostwald-de-Waelle (Lei da Potência). $T=30^{\circ}$, $16,9^{\circ}\text{Brix}$.- Reômetro Contraves Rheomat 115

5.CONCLUSÃO

O sistema ZA30 do reômetro Haake Rotovisco, apresentou efeito de instabilidade no comportamento real do fluido. Isto foi evidenciado nos resultados obtidos experimentalmente para suco de manga à temperatura 30°C e 16,9°Brix. Nos experimentos a taxa de deformação é confiável a partir de $50s^{-1}$, como pode ser observado nas figuras (4.1 a 4.15).

Os resultados obtidos no reômetro Haake Rotovisco, ajustados pelo modelo de Casson, mostraram que os parâmetros K_o e K_c , não aumentaram com a redução da abertura da malha na peneiragem, exceto para as malhas 0,84mm e 0,149mm, para as quais o parâmetro K_o aumentou. Já para o reômetro Contraves Rheomat 115 os parâmetros K_o e K_c , manteve-se praticamente constante, com exceção da malha 0,59mm e do centrifugado. A concentração de sólidos insolúveis não teve grande influência sobre os parâmetros K_o e K_c . A análise estatística mostrou um bom ajuste da curva com o modelo proposto, no caso do reômetro Haake Rotovisco. Já com os resultados do reômetro Contraves Rheomat, o ajuste não é tão bom. Estes resultados são mostrados nas Tabelas (4.1 e 4.5).

Para o modelo de Mizrahi-Berk, a partir dos dados obtidos no reômetro Haake Rotovisco, o parâmetro K_{OM} , aumentou com a diminuição das malhas das peneiras, com exceção da malha 0,59mm e para o centrifugado. Já para o reômetro Contraves Rheomat, com a diminuição das malhas o parâmetro K_{OM} dos filtrados, “in natura” e centrifugado atingiram valores negativos, com exceção do filtrado de malha 0,84mm. Já a concentração de sólidos insolúveis não mostrou grande influência sobre os parâmetros de K_{OM} e K_M . A análise estatística para dados dos reômetros Haake Rotovisco e Contraves Rheomat em todas as amostras, mostrou um bom ajuste da curva com o modelo proposto, como pode ser observado nas Tabelas (4.3 e 4.6).

A análise estatística para o reômetro Haake Rotovisco em todos os filtrados e centrifugado, mostrou um bom ajuste dos dados à curva. Já utilizando-se o

reômetro Contraves Rheomat, mostrou que o modelo de Herschel-Bulkley não é o melhor ajuste para estes casos, com exceção do filtrado de malha 0,59mm e para o centrifugado, como pode ser observado nas Tabelas (4.4 e 4.7). A concentração de sólidos insolúveis não teve uma grande influência sobre os parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley.

Usando-se o reômetro Haake Rotovisco, mostrou que o modelo de Ostwald-de-Waele mostrou-se um bom ajuste para os dados obtidos no reômetro Haake Rotovisco. Para os dados do reômetro Contrave Rheomat, o modelo de Ostwald-deWaele, não é o melhor ajuste, exceto no filtrado de malha 0,84mm e para o centrifugado, como pode ser visto nas Tabelas (4.2 e 4.8). A concentração de sólidos insolúveis não teve uma grande influência sobre os parâmetros do modelo de Ostwald-de-Waele.

Na comparação entre os dois reômetros, observou-se em todos os reogramas para uma mesma temperatura e concentração, que os dados obtidos com o reômetro Haake Rotovisco, propiciaram um melhor ajuste para todos os modelos estudados.

6-SUGESTÕES

Estudar o comportamento reológico no desenvolvimento de novos produtos e novos processos. Esses estudos são importantes já que a indústria trabalha com uma grande variedade de materia prima utilizando os mesmos equipamentos. As frutas tem diferenças muito grandes entre si, quanto à maneira em que vão interagir com os equipamentos de processos. É fato amplamente conhecido que algumas tem fibras insolúveis que afetam muito o processo como é o caso do abacaxi, enquanto outras tem sólidos solúveis que afetam muito o processo, como é o caso de manga.

Até o momento, os estudos reológicos se concentram apenas em mostrar o efeito de sólidos solúveis e insolúveis, mas o efeito é diferente para frutas diferentes e às vezes até para as mesmas frutas, porém de variedades diferentes. Essa variedade de comportamento e seus motivos precisam começar a serem estudadas de formas sistemáticas.

7-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) AMSTALDEN, L. C. Estudo da deposição de hesperidina em evaporadores da indústria de citrus. Campinas (SP): UNICAMP, 1996. 94p. Tese de Mestrado.
- 2) BIRD, R. B. ; STEWART, W. E. ; LIGHTFOOT, E. N. Fenômenos de Transporte Editorial Reverté, S.A. ; 1960.
- 3) BRANCO, I. G. Suco de laranja concentrado-comportamento reológico a baixas temperaturas. Campinas (SP), UNICAMP, 1995. 88p. Tese de Mestrado.
- 4) CHARM, S. Viscometry of on-newtonian food materials. Food Research, Chicago, 25(3): 351-362, 1960
- 5) CRANDALL, P. G. , CHEN, C. S. and CARTER, R. D. Models for predicting viscosity of orange juice concentrate. Food Technology, nº 36, vol. 5, p. 245-252, 1982.
- 6) CASSON, N. , 1959, A flow equation for pigment-oil suspensions of the printing ink type, in Rheology of Disperse Suspensions, C. C. Mill (Ed), (Pergamon press, New York).
- 7) DALMO, L. S. NEIDE, B. ; VÂNIA, D. C. ; H. V. R. ; FLÁVIO, A. A. C. Características físicas e químicas de vinte cultivares de mangueira (*Mangífera indica* L.), Uberaba-Mg. Revista Brasileira de Fruticultura. v.10, n. 2 p. 49-54, 1988.
- 8) FRANCO, G. Tabela de composição química de alimentos. 9 ed. SP: Atheneu, 1992, p177.
- 9) FORMAGGIO, G. J. Projeto, construção e ensaio de um viscosímetro capilar. Campinas(SP), UNICAMP, 1982. 87p. Tese de Mestrado.

- 10) GENETOLLE, J. Expression de las viscosités des solutions sucrées. Industries Alimentaires et Agricoles, Paris, 95(718): 747-755, 1978.
- 11) GEHRKE, T. Reometria de suco concentrado de frutas. Campinas(SP), UNICAMP, 1996. 52p. Tese de Mestrado.
- 12) GOVIER, G. W. The flow of complex mixtures in pipes. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1972.
- 13) GASPARETTO, C. A. Comportamento Reológico dos Fluidos Reais. São Carlos, S.P. 1983.
- 14) GORDON, D. T. Functional properties vs physiological action of total dietary fiber, Cereal Foods World, Minneapolis, v. 34, n. 7, p. 517-518, 520-525, July, 1989.
- 15) HOLDSWORTH, S. D. Applicability of rheological models to the interpretation of flow and processing behavior of fluid food products. J. texture Studies, Dordrecht, 2(4): 393-418, 1971.
- 16) HULME, A. C. The biochemistry of fruit and their products. London: Academic Press, 1970, v. 2, 788p.
- 17) IBARZ, A. , GONZALEZ, C. , ESPLUGAS, S. , VICENTE, M. Rheology of clarified fruit juices. I: Peach juices. Journal of Food Eng. , v. 15, n. 1, p. 49-61, 1992.
- 18) JIMENES, G. & DURAN, L. Propriedades reológicas de produtos derivados de frutas y tomate. Revista de agroquímica y tecnología de Alimentos, Valência, 19(2): 203-216, 1979.
- 19) MEDINA, J. C. BLEINROTH, E. W. DE MARTIN, Z. J. QUAST, D. G. HASHIZUME, T. FIGUEIREDO, N. M. S. CANTO, W. L. BICUDO NETO, L. C. Manga da cultura ao processamento e comercialização, Instituto de Tecnologia de Alimentos, Campinas (Série Frutas Tropicais), n. 8, 1981.

- 20) MENJIVAR, J. A. & RHA, C. K. Viscoelastic effect in concentrated protein dispersions. Rheol. Acta, Darmstadt, 19(2): 212-219, 1980.
- 21) MIZRAHI, S. & BERK, Z. Flow behaviour of concentrated orange juice mathematical treatment. Journal of Texture Studies, v.3, n.1, p. 69-79, 1971.
- 22) MIZRAHI S. and BERK, Z. Flow behaviour of concentrad orange juice: mathematical treatment. Journal of Texture n. 1, v. 3. p. 69-79, 1972.
- 23) NAGY, S. , CHEN, C. S. , SHAW, P. E. Fruit juice processing technology. Agscience, Inc. Alburquerque, Flórida. 1993. 713p.
- 24) NAGY, S, SHAW, P. E. Tropical and subtropical fruits: composition properties and uses.Connecticut: The Avi Publishing Company, 1980. 570p.
- 25) ONOFRE, P. M. Redução da viscosidade em suco de laranja com tratamento enzimático. Campinas: UNICAMP, 1995. 71p. tese de Mestrado.
- 26) PRADO, M. E. T. Vida de prateleira e perda de vitamina C durante o armazenamento de um alimento de umidade intermediária obtido da mistura suco-polpa de manga (Mangifera indica L.). desenvolvimento de modelos matemáticos. Lavras (MG): UFL. 1994. 112p. Tese de Mestrado.
- 27) PINTO, A. C. de Q. & GENÚ, P. J. de C. Qualidade de frutos de seis variedades de mangas (Manfigera indica L.), brasileiras cultivadas na região dos cerrados. Planaltina, CPAC, 1981, 11p. (CPAC, Boletim, 4).
- 28) QUEIROZ, A. J. M. , VIDAL, J. R. M. , VIDAL, B. C. , GASPARETTO, C. A. Influência dos sólidos suspensos na reologia do suco de abacaxi. Encontro sobre escoamento em meios porosos, (ENEMP), XXIV. 1996, Uberlândia-MG.
- 29) RODRIGUES, J. A. S. ; PINHEIRO, R. V. R. ; MANICA, I ; CASALI, V. W. D. & CONDÊ, A. R. Comportamento de dez variedades de manga (Mangifera

indica L.) em Viçosa e Visconde do Rio Branco, Ceres, Viçosa, 24 (136): 580-95, nov / dez. 1977.

- 30) RAO, M. A. BOURNE, M. C. & COOLEY, H. J. Flow properties of tomato concentrates. J. Texture Studies, Westport, 12(4): 521-538, 1981.
- 31) RAO, M. A. Rheology of liquid foods - J. Texture Studies, v. 8 (2), p.135-168, 1977.
- 32) RAO, M.A. Rheological propertis of fluid foods. In: RAO, M. A. & RIZVI, S. S. H. (eds) , Engineering properties of foods, p. 1-47, MARCEL DEKKER, New York, Food Science and Technology series, n. 19, 1986.
- 33) ROEHRIG, G. K. L. The physiological effects of dietary fiber a review. Food Hydrocolloids. Oxford, v. 2, n. 1, p.1-18,1988.
- 34) RAO, M. A. and COOLEY, H. J. Applicability of flow models with yield for tomato concentrates. Journal of Food Process Engineering, n. 3, v. 6, p. 159-173, 1981.
- 35) SUNFELD, E. Propriedades reológicas do suco clarificado de caju (Anacardium occidentale, Linn), Exame de qualificação para Doutorado, UNICAMP (SP), 1994, 80p.
- 36) SARAVACOS, G. D. Effect of temperature on viscosity of fruit juices and purees. Journal of Food Science, v.35, n.2, p. 122-5, 1970.
- 37) SCHRAMM, G. A practical approach to rheology and rheometry. karlsruhe, Gebrueder Haake Gmbh, 1994, 289p.
- 38) SALUNKE, D. K. & DESAI, B. B. Postharvest biotechnology of fruits. Boca Raton, CRC Press. 1984. v. 1, p. 77-93.

- 39) SARAVACOS, G. C. & MOYER, J. C. Tube viscometry of tomato juice and concentrates. Geneva, N. Y. , New York State. Agricultura Experiment Station. Cornell University. Department of Food Science and Technology, 11p, 1967.
- 49) SKELLAND, A. H. P. Non-Newtonian flow and heat transfer. New York, John Wiley & Sons, 469p, 1967.
- 41) SCHLIEPHAKE, D. I. On the struture of aqueous sucrose solutions. Zucker, Hannover, 16 (9): 523-527, 1963.
- 42) SOUTHGATE, D. A. T. What is "dietary fibre"? Food Technology in Australia, North Sydney, v. 33, n. 1, p. 24-25, jan. 1981.
- 43) SCHNEEMAN, B. O. Dietary. Food Technology, Chicago, v. 43, n. 10, p. 133-139, 1989.
- 44) TORREST, R. S. Rheogical properties of aqueous solutions of the polimer natosol 250 HHR. Journal of Rheology, 26 (2): 143-151, 1982.
- 45) TELIS J. R. & GASPARETTO, C. A. Parâmetros de escoamento do suco de laranja concentrado utilizando dados da força de arraste atuando sobre uma esfera. XXI Encontro sobre escoamento em meios porosos. Ouro Preto, Minas gerais. Anais, v. 1, 243-254, 1993.
- 46) TELIS, J. R. and VIEIRA, J. A. G. Reologia de fluidos alimentícios com taxa de deformação intermediária utilizando o reômetro de esfera descendente. Encontro sobre escoamento em meios porosos, (ENEMP)-São Carlos, Anais, IV. 1, 323-334, 1992.
- 47) VAN WAZER, R. J. , LYONS, J. W. ; KIM, K. I. & COLWELL, R. E. Viscosity and flow measurement: a laboratory hadbrook of rheology. New York, Interscience Publishers, 406p, 1963.
- 48) VAQUEZ-SALINAS, C. LAKSHMINAROYANA, S. Journal of Food Science, Chicago, v. 50, p. 1646-1648, 1985.

49) VOCADLO, J. J. and CHARLES, M. E. Measurement of yield stress of fluid. Like Viscoplastic Substances. Can. J. Chem. Eng. 49; p. 576-582, 1971.

50) KRIEGER, C. L. & ELROD, H. Direct determination of the flow curves of non-newtonian fluids. Shearing rate in the concentric viscometer. Journal of Applied Physics, 24 (2); 134-136, february, 1953.

51) Vitali, A. A. "Comportamento reológico de purê de goiaba (*psidium guajava* L.) em função da concentração e temperatura. ~~São Carlos~~ - USP, 1981. 151p. Tese de mestrado.