BRUNO PERUCHI TREVISAN

**AVALIAÇÃO DA TENSÃO SUPERFICIAL, PARÂMETROS
REOLÓGICOS E ATENUAÇÃO ACÚSTICA DE SUSPENSÕES
DE AÇAÍ.**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: **Térmica e Fluidos**

Orientador: **Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes**

São Carlos
2011

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Trevisan, Bruno Peruchi.

T813p Avaliação da tensão superficial, parâmetros reológicos e atenuação acústica de suspensões de açaí. / Bruno Peruchi Trevisan ; orientador Sérgio Rodrigues Fontes. São Carlos, 2011.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Térmicas e Fluidos)-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

1. Açaí. 2. Suspensões. 3. Reologia. 4. Atenuação acústica. 5. Tensão superficial. 6. Microfiltração. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **BRUNO PERUCHI TREVISAN**

Título da dissertação: “Propriedades físicas de suspensões de açaí e variações associadas no processamento por microfiltração”.

Data da defesa: 14/10/2011:

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Sergio Rodrigues Fontes (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Luiz Antonio Viotto**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

Prof^a. Dr^a. **Cynthia Ditchfield**
(Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/FZEA)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Marcelo Areias Trindade**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

Dedico este trabalho aos meus pais, Antonio Roberto Trevisan e Madalena Peruchi Trevisan, e ao meu irmão Diego Peruchi Trevisan.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Profº. Dr. Sergio R. Fontes, pela orientação, paciência e confiança na minha capacidade para realizar este trabalho.

A todos os professores, técnicos e funcionários do Laboratório de Engenharia Térmico e Fluido, do Departamento de Engenharia Mecânica (USP/ São Carlos) pelo auxílio.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) agradeço pela concessão da bolsa de mestrado e pelo suporte financeiro.

Aos meus familiares que me incentivaram a seguir em frente.

À Dra. Rita Margarete Donato Machado, meus sinceros agradecimentos pela co-orientação deste trabalho.

Aos meus colegas de sala pelos momentos de estudos e descontrações que passamos juntos.

A todos os colegas de trabalho, meus sinceros agradecimentos por compartilharem diversos momentos de aprendizagem.

Em especial, agradeço imensamente a todos os amigos que conquistei ao longo dessa vida.

A todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho.

A todos, sinceramente muito obrigado!

Resumo

Trevisan, B. P. (2011). **Propriedades Físicas de Suspensões de Açaí e Variações Associadas no Processamento por Microfiltração.** 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

Nesta pesquisa teve-se como objetivo estudar as propriedades físicas de polpas de açaí disponíveis comercialmente, tais como: pH, condutividade, viscosidade, tensão superficial e atenuação acústica, em função da temperatura e de particulados presentes na suspensão de açaí. Foram selecionadas quatro marcas comerciais de polpa de açaí originárias da região norte do Brasil. As amostras foram estudadas na forma pura (sem diluição) e diluídas. As análises de tensão superficial foram conduzidas utilizando o tensiômetro da Sensadyne (modelo QC6000) na faixa de temperatura de 15°C a 60°C. Observou-se uma variação da tensão superficial entre as marcas estudadas e em todos os casos a polpa de açaí diluída apresentou tensão superficial superior à polpa pura. Para valores de temperatura maiores que 45°C, a tensão superficial aumentou com a temperatura para duas marcas estudadas. A verificação da atenuação e do tamanho de partículas foi realizada utilizando a técnica de espectroscopia de atenuação acústica com o equipamento APS-100 (Matec Applied Science, Northborough, USA). A polpa diluída apresentou uma menor atenuação com relação à polpa pura. As polpas de açaí, pura e diluída, apresentaram partículas com tamanho inferior a 0,6 µm de diâmetro, sendo que a polpa pura apresentou partículas com diâmetros maiores. Na investigação reológica foram utilizados reômetros rotacionais (Modelo *DVIII+*) da marca

Brookfield com geometrias de cone-placa e cilindros concêntricos na faixa de temperatura de 15°C a 60°C. Os reogramas obtidos foram ajustados aos modelos de Ostwald-de-Waale (Lei da Potência) e Herschel-Bulkley, sendo que o melhor ajuste foi obtido com o modelo de Lei da Potência. Todas as amostras estudadas apresentaram comportamento reológico não-Newtoniano, com características de fluidos tixotrópicos. Foi investigado também o comportamento reológico de polpas de açaí tratadas enzimaticamente para posterior processamento por microfiltração tangencial. As enzimas comerciais Pectinex Ultra SP-L, Biopectinase KK Plus e Ultrazym AFPL foram avaliadas separadamente e a respectiva eficiência foi analisada pela redução da viscosidade no reômetro rotacional com a geometria de cone-plana. A enzima comercial Ultrazym foi mais eficiente na redução da viscosidade aparente da polpa de açaí, sendo que as enzimas Pectinex e Biopectinase não apresentaram alteração significativa da viscosidade. A análise da viscosidade aparente dos produtos (permeado e retentado) da microfiltração utilizando membranas cerâmicas comerciais de 0,8 e 0,2 μm foi feita utilizando o reômetro rotacional com a geometria de cone-placa, na temperatura de 25°C. Para o processamento por microfiltração sem tratamento enzimático, o retentado apresentou valores de viscosidade aparente superior ao permeado e à polpa diluída, enquanto que a polpa diluída apresentou viscosidade aparente superior ao permeado. Na microfiltração com tratamento enzimático a polpa diluída apresentou viscosidade aparente inferior ao permeado, comportamento observado para as duas membranas estudadas (0,8 e 0,2 μm). Com os resultados obtidos foi possível verificar a grande variação nas propriedades físicas de polpas comerciais de açaí e com isso, a importância de se realizar tais medidas para a otimização de processos como a microfiltração tangencial.

Palavras-Chave: Açaí, Suspensões, Reologia, Atenuação Acústica, Tensão Superficial, Microfiltração.

Abstract

Trevisan, B. P. (2011). **Analysis of surface tension, ultrasound attenuation and rheological parameters of açai' suspensions.** 138p. M.Sc. Dissertation (Master in Mechanical Engineering), School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2011.

The main objective of this research was the study of physical properties of commercial types of açai pulp; including pH, electric conductivity, viscosity, surface tension and acoustic attenuation as a function of temperature and particulates of açai suspension. Four types of açai pulp from north region of Brazil were selected. The samples were analyzed in pure (undiluted) and diluted form. Surface tension was measured with Sensadyne tensiometer (model QC6000) in the temperature range: 15° to 60° Celsius. In all types of pulp studied the surface tension of diluted sample was higher than pure sample. For temperatures above 45° Celsius surface tension increased for two types of açai pulp studied. Acoustic attenuation and particle size of samples were analyzed with the equipment APS-100 from Matec Applied Science, Northborough, USA. Acoustic attenuation of diluted samples is smaller for pure samples; the açai pulp (pure and diluted) has particle sizes below 0,6 μm and the particle sizes of the pure samples were larger than the diluted samples. Brookfield/USA rotational rheometers (Model DVIII+) was employed for rheological analysis with two geometries: cone-plate and concentric cylinders in the temperature range: 15° to 60° Celsius. The rheological behavior was adjusted by Ostwald-de-Waale model (or Power-law model) and Herschel-Bulkley model; the Ostwald-de-Waale model showed a better fit. All brands of pulp

studied presented non-Newtonian behavior with tixotropic characteristics. It also investigated the rheological behavior of açai pulp treated enzymatically for later processing by tangential microfiltration. The commercial enzymes: Pectinex Ultra SP-L (Novozymes - Bagsvaerd, Dinamarca), Biopectinase KK Plus (Kerry Bio-Science) and Ultrazym AFPL (Novozymes - Bagsvaerd, Dinamarca), were utilized to reduce viscosity and the effect was evaluated with the cone-plate geometry of the Brookfield/USA rheometer (Model DVIII+). The data shows that the Ultrazym enzyme was the best option for viscosity reduction of açai pulp, and the other presented no changes in the viscosity. The viscosity of the retentate and permeate from the microfiltration process (membranes with cut-off 0,8 and 0,2 μm) was determined with the cone-plate geometry of the Brookfield/USA rheometer (Model DVIII+) at 25° Celsius. In microfiltration process without enzymatic action, the apparent viscosity of retentate was always higher than the retentate from diluted pulp. With the results we observed the large variation in physical properties of commercial açai pulp and thus, the importance of carrying out such measures for the optimization of processes such as tangential microfiltration.

Key-words: Açai Pulp, Suspensions, Rheology, Surface Tension, Acoustic Attenuation, Microfiltration.

Lista de Figuras

Figura 1: Esquema da Microfiltração perpendicular.	9
Figura 2: Esquema da Microfiltração tangencial.	9
Figura 3: Classificação dos Fluidos segundo seu comportamento reológico.	14
Figura 4: Curvas de escoamento para fluidos independentes do tempo.	16
Figura 5: Curvas de escoamento para fluidos dependentes do tempo.	18
Figura 6: Forças que atuam sobre moléculas típicas no interior e na superfície do líquido. Adaptado de PALMER, 1976.	28
Figura 7: Definição de ângulo de contato.	30
Figura 8: Representação do ângulo de contato entre superfície hidrofílica (a) e hidrofóbica (b). Em superfície hidrofílica (a) há a penetração espontânea dentro do poro; em contrapartida, na hidrofóbica (b) pressão é necessária para a introdução da gotícula no poro.	31
Figura 9: Mecanismos de atenuação acústica.	36
Figura 10: Tensiômetro da Sensadyne (modelo QC6000).	45
Figura 11: Diagrama esquemático do método da máxima pressão de bolha.	46
Figura 12: APS-100 da Matec Applied Science.	47
Figura 13: Reômetros rotacionais marca da Brookfield (Rheometer DVIII+) com a geometria: a) Cilindros concêntricos; b) Cone-placa.	49
Figura 14: Desenho esquemático do reômetro de cilindros concêntricos.	50

Figura 15: Desenho esquemático do reômetro de cone-placa.....	51
Figura 16: Desenho esquemático da bancada experimental de microfiltração.	53
Figura 17: Gráfico da Tensão Superficial (N/m) em função da temperatura (Celcius). (a) Polpas Pura; (b) Polpas diluída.	56
Figura 18: Gráfico da Tensão Superficial (N/m) em função da temperatura (Celcius). Comparação entre marcas para polpa pura e diluída: (a) 1; (b) 2; (c) 3 e (d) 4.	57
Figura 19: Gráfico da Atenuação (dB/cm) em função da Frequência (Mhz): (a) Polpas Puras; (b) Polpas diluídas.....	58
Figura 20: Gráfico da Atenuação (dB/cm) em função da Frequência (Mhz). Comparação entre polpa pura e diluída das marcas: (a) 1; (b) 2; (c) 3 e (d) 4.....	59
Figura 21: Distribuição do tamanho das partículas presentes em polpa de açaí: (a) Puras; (b) Diluídas.	60
Figura 22: Distribuição do tamanho das partículas presentes em polpa de açaí. Comparação entre polpa pura e diluída das marcas: (a) 1; (b) 2; (c) 3 e (d) 4.....	62
Figura 23: Gráfico da Atenuação (dB/cm) em função da Frequência (Mhz) da polpa de açaí após tratamento enzimático utilizando as enzimas comerciais Biopectinase KK Plus, Pectinex Ultra SP-L e Ultrazym AFPL na concentração de 500 mg/kg polpa de açaí no tempo de incubação de 30 minutos a 35°C.....	63
Figura 24: Distribuição do tamanho das partículas presentes em polpa de açaí após tratamento enzimático utilizando as enzimas comerciais Biopectinase KK Plus, Pectinex Ultra SP-L e Ultrazym AFPL na concentração de 500 mg/kg polpa de açaí no tempo de incubação de 30 minutos a 35°C.....	64
Figura 25: Gráfico da tensão de cisalhamento versus a taxa de deformação usando diferentes gaps para a temperatura de 25°C: a) Marca 1; b) Marca 2; c) Marca 3 e d) Marca 4	67
Figura 26: Gráfico da tensão de cisalhamento versus a taxa de cisalhamento para a polpa pura de açaí da marca 1 na temperatura de 15°C utilizando a geometria: a) cone-placa; b) cilindros concêntricos.	69
Figura 27: Gráfico da tensão de cisalhamento versus a taxa de cisalhamento para a polpa pura de açaí da marca 2 na temperatura de 15°C utilizando a geometria: a) cone-placa; b)	

cilindros concêntricos.....	69
Figura 28: Gráfico da tensão de cisalhamento versus a taxa de cisalhamento para a polpa pura de açaí da marca 3 na temperatura de 15°C utilizando a geometria: a) cone-placa; b) cilindros concêntricos.....	70
Figura 29: Gráfico da tensão de cisalhamento versus a taxa de cisalhamento para a polpa pura de açaí da marca 4 na temperatura de 15°C utilizando a geometria: a) cone-placa; b) cilindros concêntricos.....	70
Figura 30: Gráfico da tensão de cisalhamento versus a taxa de cisalhamento para a polpa diluída de açaí na temperatura de 15°C utilizando a geometria cone-placa para: a) Marca 1; b) Marca 2, c) Marca 3 e d) Marca 4.....	72
Figura 31: Gráfico da viscosidade aparente para diferentes temperaturas da polpa de açaí pura da marca 1 utilizando a geometria: a) cone-placa; b) cilindros concêntricos.....	85
Figura 32: Gráfico da viscosidade aparente para diferentes temperaturas da polpa de açaí pura da marca 2 utilizando a geometria: a) cone-placa; b) cilindros concêntricos.....	85
Figura 33: Gráfico da viscosidade aparente para diferentes temperaturas da polpa de açaí pura da marca 3 utilizando a geometria: a) cone-placa; b) cilindros concêntricos.....	86
Figura 34: Gráfico da viscosidade aparente para diferentes temperaturas da polpa de açaí pura da marca 4 utilizando a geometria: a) cone-placa; b) cilindros concêntricos.....	86
Figura 35: Gráfico da viscosidade aparente versus a taxa de cisalhamento para diferentes temperaturas da polpa de açaí diluída utilizando a geometria de cone-placa para as marcas: a)1, b)2, c)3 e d)4.	87
Figura 36: Comportamento da viscosidade aparente das amostras de polpa de açaí submetidas a hidrolise enzimática utilizando Pectinex Ultra SP-L na concentração de 500 mg/kg polpa de açaí nos tempos de incubação especificados: 30, 60, 90 e 120 minutos a 35°C. Pura – polpa de açaí apenas descongelada.	88
Figura 37: Comportamento da viscosidade aparente das amostras de polpa de açaí submetidas a hidrolise enzimática utilizando Biopectinase KK Plus na concentração de 500 mg/kg polpa de açaí nos tempos de incubação especificados: 30, 60, 90 e 120 minutos a 35°C. Pura – polpa de açaí apenas descongelada.	89
Figura 38: Comportamento da viscosidade aparente das amostras de polpa de açaí submetidas a hidrolise enzimática utilizando Ultrazym AFPL na concentração de 500 mg/kg	

polpa de açaí nos tempos de incubação especificados: 30, 60, 90 e 120 minutos a 35°C. Pura – polpa de açaí apenas descongelada. 89

Figura 39: Comportamento da viscosidade aparente das amostras de polpa de açaí submetidas a hidrólise enzimática utilizando Ultrazym AFPL na concentração de 1000 mg/kg polpa de açaí nos tempos de incubação especificados: 30, 60, 90 e 120 minutos a 35°C. Pura – polpa de açaí apenas descongelada. 90

Figura 40: Viscosidade aparente de amostras originárias da microfiltração utilizando membrana de 0,8 mm para: a)MF1 e b)MF2 sem tratamento enzimático e c)MF3 com tratamento enzimático. 92

Figura 41: Viscosidade aparente da microfiltração utilizando membrana de 0,2 µm para: a)MF4 e b)MF5 sem tratamento enzimático e c)MF6 com tratamento enzimático. 93

Lista de Tabelas

Tabela 1: pH e condutividade elétrica da polpa de açaí pura e diluída.	55
Tabela 2: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí pura da marca 1, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cone-placa.....	74
Tabela 3: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí pura da marca 2, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cone-placa.....	74
Tabela 4: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí pura da marca 3, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cone-placa.....	75
Tabela 5: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí pura da marca 4, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cone-placa.....	75
Tabela 6: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí pura da marca 1, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cilindros concêntricos.....	76
Tabela 7: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí pura da marca 2, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cilindros concêntricos.....	77
Tabela 8: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí pura da marca 3, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cilindros concêntricos.....	77
Tabela 9: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí pura da marca 4, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cilindros concêntricos.....	78

Tabela 10: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí diluída da marca 1, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cone-placa.	79
Tabela 11: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí diluída da marca 2, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cone-placa.	79
Tabela 12: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí diluída da marca 3, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cone-placa.	80
Tabela 13: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí diluída da marca 4, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cone-placa.	80
Tabela 14: Calculo das áreas embaixo das curvas dos reogramas obtidos, para a polpa de açaí pura da marca 1, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C.	82
Tabela 15: Calculo das áreas embaixo das curvas dos reogramas obtidos, para a polpa de açaí pura da marca 2, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C.	82
Tabela 16: Calculo das áreas embaixo das curvas dos reogramas obtidos, para a polpa de açaí pura da marca 3, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C.	83
Tabela 17: Calculo das áreas embaixo das curvas dos reogramas obtidos, para a polpa de açaí pura da marca 4, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C.	83
Tabela 18: Calculo das áreas embaixo das curvas dos reogramas obtidos, para a polpa de açaí diluída, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C.	84
Tabela 19: Porcentagem (%) de redução da viscosidade no ponto de maior taxa de deformação (193 1/s) em comparação a viscosidade da polpa pura.	91

Lista de Símbolos

APS	<i>Average Particle Size</i>	
C_p	Calor específico á pressão constante	$J/kg.K$
R^2	Coeficiente de determinação	
β	Coeficiente de expansão térmica	$^{\circ}C^{-1}$
κ	Condutividade térmica	$W/m.K$
ρ	Densidade	kg/m^3
ω	Frequência angular	Hz
n	Índice de comportamento	
K_H	Índice de consistência de Herschel-Bulkley	$Pa.s$
μ	Massa molecular	Kg/mol
MF	Microfiltração	
Re	Número de Reynolds	
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação	s^{-1}
T	Temperatura	$^{\circ}C$
τ	Tensão de cisalhamento	Pa
τ_0	Tensão de cisalhamento inicial	Pa
γ	Tensão superficial	N/m
c	Velocidade da luz	m/s

η	Viscosidade	$Pa.s$
--------	-------------	--------

η_a	Viscosidade Aparente	$Pa.s$
----------	----------------------	--------

Sumário

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.1. INTRODUÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. PRODUÇÃO E GENERALIDADES DA POLPA DE AÇAÍ.....	5
2.2. MICROFILTRAÇÃO.....	7
2.3. REOLOGIA.....	11
2.3.1. CLASSIFICAÇÃO REOLÓGICA.....	13
2.3.2. MODELOS REOLÓGICOS	22
2.4. TENSÃO SUPERFICIAL	27
2.5. ESPECTROSCOPIA DE ATENUAÇÃO ACÚSTICA.....	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1. MATÉRIA PRIMA	43
3.2. ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DA POLPA	43
3.2.1. pH	43
3.2.2. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	44
3.2.3. TENSÃO SUPERFICIAL	44
3.2.4. ESPECTROSCOPIA DE ATENUAÇÃO ACÚSTICA.....	46
3.3. DADOS REOLÓGICOS	48
3.4. PROCESSAMENTO DE RESULTADOS	51
3.5. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA COMO FERRAMENTA PARA AUXILIAR NA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSAMENTO DE SUSPENSÕES DE AÇAÍ VIA MICROFILTRAÇÃO TANGENCIAL.....	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1. pH E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	55
4.2. TENSÃO SUPERFICIAL	55
4.3. ESPECTROSCOPIA DE ATENUAÇÃO ACÚSTICA.....	58
4.4. COMPORTAMENTO REOLÓGICO.....	65

4.5. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS REOLÓGICOS	73
4.6. ANÁLISE DE HISTERESE	81
4.7. VISCOSIDADE APARENTE	85
5. CONCLUSÕES	95
6. TRABALHOS FUTUROS	97
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

1. Introdução e Objetivos

1.1. INTRODUÇÃO

A polpa de açaí, um alimento muito consumido pelas populações regionais, tem se tornado um dos produtos principais de exportação do estuário amazônico para outras regiões brasileiras e para outros países da América do Norte, Ásia e Europa (NOGUEIRA et al., 2005). O potencial para produção do açaí é grande e ainda desordenado, sendo que o açaí na forma de bebida pode agregar um valor econômico significativo para o Brasil. Para ilustrar, pode-se citar o caso da cultura de manga que alcançou nos últimos anos importância econômica no mercado internacional devido a sua aceitação na forma de sucos, geléias, fibras dietéticas e outros produtos.

Como o açaí é um fruto brasileiro com grande potencial de mercado, torna-se interessante o estudo de processos que possam agregar valor e/ou que permitam sua aplicação em novos produtos. A microfiltração (MF) tangencial por membranas constitui uma alternativa para a conservação e produção de suco clarificado de açaí, sendo uma tecnologia limpa sem a produção de resíduos e utilização de conservantes químicos, além da possibilidade da pasteurização a frio que permite a preservação de componentes termossensíveis de interesse nutricional e sensorial, como os micronutrientes, as vitaminas e os componentes do aroma, sabor e cor (CHERYAN, 1998; PALLET et al., 2005; MALLADA

et al., 2008). Atualmente, a MF tangencial está sendo muito utilizada na indústria de bebidas com a finalidade de clarificar e/ou concentrar sucos de frutas devido à possibilidade de eliminação de diversas etapas do processamento tradicional, reduzindo tempo, energia, mão-de-obra e gastos com coadjuvantes de clarificação (VAILLANT et al., 1999; GIRARD et al., 2000; PAULA et al., 2004; USHIKUBO, 2006).

No entanto, o processo de microfiltração com membrana possui limitações no que envolve misturas ou fluidos complexos, uma vez que os fenômenos de superfície junto ao meio filtrante (membrana) podem ocasionar reduções significantes no fluxo de permeado em decorrência da elevada concentração de sólidos solúveis e insolúveis presente em polpas de frutas. Como no caso de suspensões de açaí cuja composição é de alta concentração de fibras, principalmente a insolúvel, além de gordura, sais minerais e pigmentos (YUYAMA et al., 2004; MENEZES et al., 2008). Em estudos realizados no laboratório do Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos (NETeF) com polpa de açaí foi possível observar que a microfiltração tangencial utilizando membranas cerâmicas comerciais de alumina (Al_2O_3) produziu suco clarificado de açaí de cor vermelho claro. Os resultados indicaram que ocorreu grande retenção de partículas diversas, incluindo glóbulos de gordura, sólidos particulados, bactérias e pigmentos pelas membranas, ocasionando diminuição do fluxo do permeado (FONTES & CAMINOTO, 2007; HANEDA & FONTES, 2008).

Os dados na literatura sobre propriedades reológicas e físicas do suco de açaí são escassos, assim como os processos que envolvem clarificação e concentração do suco de açaí. Na investigação do processo de microfiltração, alguns parâmetros físicos e físico-químicos são de especial importância, dentre eles, viscosidade, pH, tensão superficial e teor de sólidos suspensos. O conhecimento do comportamento reológico de sucos e suas variações com a temperatura é útil também como parâmetro de controle de qualidade, e de grande importância

para a indústria de processamento, no dimensionamento de equipamentos de agitação, filtração, como também na economia de energia.

Em vista disso, o presente trabalho investigou as propriedades físicas de polpas de açaí disponíveis comercialmente, como viscosidade e tensão superficial em função de particulados presentes e da temperatura, assim como, as variações dessas propriedades durante o escoamento de suspensões diluídas de polpa de açaí em membranas tubulares. As informações sobre caracterização reológica e tensão superficial em função da temperatura e distribuição de sólidos suspensos de suspensões de açaí serão úteis para o entendimento do declínio de permeação e a formação de polarização dos componentes presentes no açaí em membrana cerâmica durante processos de microfiltração.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o comportamento reológico, a tensão superficial em função da temperatura e a distribuição de sólidos suspensos em suspensões de açaí, assim como, as variações dessas propriedades durante o escoamento de suspensões diluídas de polpa de açaí em membranas tubulares.

Os objetivos específicos deste projeto de pesquisa foram os seguintes:

- i) Estudar as propriedades físicas como viscosidade, tensão superficial e distribuição de sólidos suspensos em função da temperatura de polpas de açaí disponíveis comercialmente;
- ii) Estudar as propriedades físicas como viscosidade, tensão superficial e distribuição de sólidos suspensos em função da temperatura de suspensões diluídas de açaí após a hidrólise enzimática;

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

- iii) Estudar as variações das propriedades físicas de suspensões diluídas de açaí durante o processo de microfiltração tangencial por membranas cerâmicas;
- iv) Utilizar, na caracterização reológica, reômetros em geometrias cilíndrica e plana; medir a tensão superficial via técnica de injeção de bolhas e investigar com a técnica de atenuação acústica a distribuição de particulados na suspensão.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. PRODUÇÃO E GENERALIDADES DA POLPA DE AÇAÍ

O *Euterpe oleracea* Mart. ou açaizeiro é uma palmeira cujo fruto é o açaí. É uma espécie nativa da Amazônia, encontrada em terrenos de várzea, igapós ou terra firme (SILVA E SILVA et al, 2007). O Brasil se posiciona como o maior produtor, consumidor e exportador desse produto (MENEZES, 2005). Entre os estados produtores de açaí, o estado do Pará é responsável por 95% da produção de açaí, sendo que o consumo em Belém pode variar de 100 a 180 mil litros/dia (HOMMA & FRAZÃO, 2002; MENDES, 2003; OLIVEIRA *et al.*, 2002).

Dos frutos do açaizeiro é extraído o vinho, polpa ou simplesmente açaí, como é conhecido na região típica, constituindo o alimento básico das populações de origem ribeirinha. A polpa do açaí é consumida *in natura* e nos últimos anos também está sendo utilizada na elaboração de produtos como sorvetes, licores, doces, néctares e geléias. Devido ao seu conteúdo elevado de polifenóis antociânicos, o fruto do açaí tornou-se também uma potencial fonte para a extração de corantes naturais destinados à indústria de alimentos. O caroço corresponde a 85% do peso total, do qual a borra pode ser utilizada na produção de cosméticos; as fibras em móveis, placas acústicas, xaxim, compensados, indústria automobilística, entre outros. Os caroços limpos podem ser aproveitados na industrialização como, por exemplo, na torrefação de café, panificação, extração de óleo comestível,

fitoterápicos e ração animal, além de uso na geração de vapor, carvão vegetal e adubo orgânico. A polpa representa 15% do fruto e é aproveitada de forma tradicional no consumo alimentar e na elaboração de produtos como, sorvetes (TINOCO, 2005).

A polpa de açaí é uma bebida de grande destaque na região norte do país, sendo classificada em categorias com tipos diferentes de polpa, segundo os padrões de identidade e qualidade fixados na Instrução Normativa nº 01 de 07/01/2000: açaí grosso ou especial (tipo A), quando se tem mais que 14% de sólidos totais; açaí médio ou regular (tipo B), o mais consumido entre eles, com mais de 11% de sólidos totais, porém menos que 14%; e açaí fino ou popular (tipo C), possuindo entre 8 e 11% de sólidos totais (BRASIL, 2000). Essa classificação é relevante, pois esclarece a qual matéria-prima se refere os estudos reportados na literatura. Entretanto, nem todos os autores a mencionam, dificultando assim a comparação de muitos dados já investigados. Também são geradas dúvidas quando se menciona “açaí”, pois não se sabe ao certo se faz referência ao fruto ou à bebida (polpa). Na verdade, essa bebida não é uma polpa, apesar de ser classificada como tal, mas sim um suco, pois o produto é obtido por esmagamento das partes comestíveis do fruto açaí acrescido de água potável (BRASIL, 2003).

Atualmente, a expansão econômica do açaí já atinge novos mercados no sudeste do país, nos Estados Unidos, em alguns países membros da Comunidade Européia, no Japão e na China (ROGEZ et al., 2000; YUYAMA et al., 2004; NOGUEIRA et al., 2005; MENEZES et al., 2008).

O fruto do açaizeiro possui peso médio de 2,5 g, com forma arredondada com cerca de 1 a 1,5 cm de tamanho, e umidade em torno de 25%. A polpa do açaí é o produto extraído do epicarpo e do mesocarpo, partes comestíveis do fruto do açaí que correspondem a aproximadamente 25% em relação ao seu peso, após amolecimento obtido por processos

tecnológicos adequados (ROGEZ et al., 2000; YUYAMA et al., 2004; NOGUEIRA et al., 2005).

A polpa desse fruto tem sido objeto de alguns estudos em função de seu alto valor nutricional e sensorial com elevado percentual de lipídeos, proteínas e minerais, assim como quantidades consideráveis de fibra alimentar, particularmente a insolúvel (MENEZES, 2005; ROGEZ, 2000; SOUTO, 2001; YUYAMA et al., 2004), sendo inclusive considerada como um alimento nutracêutico face ao seu rico conteúdo de antocianinas, pigmentos hidrossolúveis responsáveis pela cor avermelhada do fruto (BOBBIO et al., 2000; IADEROZA et al., 1992; MENEZES 2005; OZELA et al., 1997). As antocianinas tornaram-se conhecidas por suas diversas propriedades farmacológicas e propriedades medicinais, incluindo anticarcinogênica, anti-inflamatória e antimicrobiana, prevenindo a oxidação de proteínas de baixa densidade (LDL), enfermidades cardiovasculares e doenças neurológicas (KUSKOSKI et al., 2002; ALASALVAR et al., 2005).

2.2. MICROFILTRAÇÃO

A indústria de alimentos em todo o mundo tem buscado mudanças visando ao aumento de produtividade e à melhoria de qualidade de produtos, de forma a fazer frente a mercados cada vez mais competitivos e a conquistar nichos mais específicos. Neste sentido, a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias alternativas de conservação, que propiciem a obtenção de produtos com melhor fator de qualidade quando comparados aos processos térmicos, vêm sendo realizados em diversos países (ROSENTHAL & SILVA, 1997). Apesar da grande eficiência nas tecnologias tradicionais de conservação, o uso de altas temperaturas é comumente conhecido por causar mudanças funcionais nos produtos processados. Essas alterações indesejáveis afetam atributos nutricionais e sensoriais. Dessa forma, muitas

vitaminas são degradadas, bem como pigmentos e substâncias aromáticas (CHEFTEL, 1995; PRÉSTAMO & ARROYO, 1998; SAN MARTÍN et al., 2002).

A crescente demanda dos consumidores por alimentos mais naturais ou frescos fez com que novas formas de preservação fossem estudadas (BARBOSA-CÁNOVAS & RODRÍGUEZ, 2002) visando a minimizar perdas qualitativas de produtos, mantendo-os mais próximos do *in natura* e com uma vida-de-prateleira mais estável (MEYER et al., 2000). Dentre essas tecnologias, destaca-se a filtração por membrana, em especial, a microfiltração (MF) (ROSENTHAL & SILVA, 1997; SANGRONIS et al., 1997; BUTZ & TAUSCHER, 2002).

A microfiltração surgiu na Alemanha pouco antes da I Guerra Mundial a qual era utilizada nos laboratórios em escala reduzida (ZEMAN & ZYDNEY, 1996; MULDER, 2000). Nos últimos 30 anos o processo de microfiltração vem sendo utilizado em vários processos industriais, atualmente a sua aplicabilidade tem aumentado em varias áreas.

A microfiltração utiliza o gradiente de pressão como força motriz, separando partículas com tamanho de 0,1 a 10 μm , através de membranas micro porosas junto a uma superfície permeável (membrana) que promove a separação de partículas (DEL COLLE, 2005; QUEIROZ, 2004).

Na microfiltração perpendicular ou convencional (fig. 1), a vazão da alimentação ocorre perpendicularmente à superfície da membrana e as partículas concentradas se acumulam na superfície e/ou nos poros da membrana, formando uma camada de filtrado sólido, que tende a aumentar com o tempo ocasionando uma diminuição no fluxo. Um aumento da pressão pode melhorar o processo por um pequeno intervalo de tempo, porém, quando ocorre obstrução dos poros, o fluxo é interrompido e a membrana tem que ser trocada,

tornando o método pouco viável. Este tipo de incrustação pode ser reduzido com a microfiltração tangencial (SCOTT, 1995; QUEIROZ, 2004).

Figura 1: Esquema da Microfiltração perpendicular.

Na microfiltração tangencial (fig. 2), a vazão da alimentação escoar paralelamente à superfície da membrana enquanto o permeado é transportado transversalmente à mesma (ZEMAN & ZYDNEY, 1996). Associado à corrente tangencial e ao fluxo transmembrana, ocorre a formação de uma camada de polarização na membrana que pode ocasionar a constrição do tamanho do poro, bloqueio do poro, ou deposição de células no topo da superfície da membrana, fazendo com que a vazão do permeado (fluxo transmembrana) diminua (CZEKAJ et al. 2001). O processo de microfiltração tangencial é governado principalmente pela formação desta camada de polarização.

Figura 2: Esquema da Microfiltração tangencial.

A microfiltração tangencial por membranas constitui uma alternativa para a conservação e produção de suco clarificado de açaí, sendo uma tecnologia limpa sem a produção de resíduos e utilização de conservadores químicos, além da possibilidade da pasteurização a frio que permite a preservação de componentes termossensíveis de interesse nutricional e sensorial, como os micronutrientes, as vitaminas e os componentes do aroma, sabor e cor (CHERYAN, 1998; PALLET et al., 2005; MALLADA et al., 2008). Atualmente, a MF tangencial está sendo muito utilizada na indústria de bebidas com a finalidade de clarificar e/ou concentrar sucos de frutas devido à possibilidade de eliminação de diversas etapas do processamento tradicional, reduzindo tempo, energia, mão-de-obra e gastos com coadjuvantes de clarificação (VAILLANT et al., 1999; GIRARD et al. 2000; PAULA et al., 2004; USHIKUBO, 2006).

HANEDA (2010) estudou o desempenho do processo de microfiltração tangencial com membranas cerâmicas aplicado à retenção de bactérias e redução de sólidos suspensos de uma bebida à base de açaí, no qual foi verificado que o processo de microfiltração tangencial, utilizando-se membranas com tamanhos de poro de 0,8 e 1,2 μ m, é uma boa alternativa não térmica para a retenção de microrganismos. O tamanho do poro da membrana e o número de Reynolds apresentaram relação direta com a porcentagem de retenção de polifenóis totais, ou seja, que quanto mais turbulento o regime de escoamento e maior o tamanho do poro da estrutura micro-porosa, menor será a retenção de polifenóis totais.

No processo de clarificação de sucos de frutas pode ocorrer também retenção de compostos de interesse nutricional e funcional pela membrana de filtração. Estudos que verificaram uma redução na concentração de antocianinas em suco clarificado de açaí em comparação à polpa, sugerem que as diferenças entre esses dois produtos possam ser diminuídas através de procedimentos de processamento de alimentos que possibilitem romper

a matriz de sólidos insolúveis para liberar antocianinas adicionais em sucos clarificados (MERTENS-TALCOTT et al., 2008; PACHECO-PALENCIA et al., 2007). Nesse sentido, o uso de enzimas que quebram os polissacarídeos da parede celular podem auxiliar tanto na extração de antocianinas como no aumento do desempenho do processo de MF. A hidrólise enzimática das paredes celulares aumenta o rendimento de extração, diminui o conteúdo de açúcares, de matéria seca solúvel, de ácidos galacturônicos e da acidez titulável. A polpa resultante tem baixa viscosidade e a quantidade de resíduos da polpa é reduzida (VAILLANT et al., 1999; UENOJO & PASTORE, 2007; WHITAKER et al., 2003).

Enzimas pectinolíticas ou pectinases formam um grupo de enzimas que degradam substâncias pécticas, hidrolisando ligações glicosídicas ao longo da cadeia carbônica. As pectinases são amplamente utilizadas na indústria de alimentos para a clarificação e redução de viscosidade em sucos de frutas, tratamento preliminar do suco de uva na produção de vinhos, liquefação e extração de polpa de frutas e vegetais, dentre outras aplicações (VAILLANT et al., 1999; UENOJO & PASTORE, 2007; KOPONEN ET AL., 2008; WONG, 2008).

2.3. REOLOGIA

A reologia é definida como a ciência que estuda o escoamento e a deformação dos materiais sobre a ação de uma força externa, é uma ciência interdisciplinar fundamental que tem ganhado importância no campo de alimentos. Inclui propriedades como: elasticidade, viscosidade e plasticidade (WELTI-CHANES et al, 2002; BIRD et al, 1960; BENNETT & MYERS, 1978).

A ciência reológica tem muitas aplicações na área de alimentos (BARBOSA-CÀNOVAS et al, 1996). Alimentos, entretanto, são matérias complexas estruturalmente e

reologicamente e, em muitos casos, eles consistem de misturas de sólidos, bem como componentes estruturais de fluidos (FINNEY, 1972).

Quando uma tensão é aplicada sobre um fluido este deforma-se irreversivelmente, ou seja, ele escoar. A energia de deformação é dissipada dentro dos fluidos em forma de calor e não pode ser recuperada, mesmo se a tensão aplicada for cessada (FINNEY, 1973).

Muitos alimentos existem em um estado intermediário de agregação conhecida como semi-sólido. Como consequência da natureza complexa e falta de um limite preciso entre os sólidos e semi-sólidos, muitos alimentos podem apresentar mais de um comportamento reológico, em função das suas características e das condições de medição utilizadas durante a caracterização física (FINNEY, 1973).

De acordo com diversos autores existem inúmeros tópicos de interesse para a indústria de alimentos relacionados com a reologia dentre eles a caracterização física de alimentos sólidos e líquidos (RAO, 1986; STEFFE, 1992; HOLDSWORTH, 1993; VÉLEZ RUIZ E BARBOSA-CÁNOVAS, 1997; BHATTACHARYA et al., 1999; VÉLEZ-RUIZ, 1999). A reologia pode ser usada para caracterizar não somente o comportamento de fluxo de materiais biológicos e inorgânicos, mas também características estruturais. Propriedades de fluxo, tais como viscosidade, tensão inicial, capacidade de escoamento, contribuem substancialmente para facilitar o transporte e o processamento comercial, bem como para promover a aceitação do consumidor (MOTYKA, 1996).

O conhecimento do comportamento reológico das frutas e seus derivados é importante como parâmetro de qualidade, além de ser indispensável em projetos, avaliação e operação de equipamentos processadores de alimentos e de fundamental importância na economia de energia, o que, atualmente, se tornou extremamente importante a ponto de cada vez mais as operações de troca de calor e massa serem otimizadas (IBARZ, 1996).

Dentre os principais fatores responsáveis pelo comportamento reológico dos produtos derivados de frutas incluem o tipo de fruta, a temperatura e o teor de sólidos solúveis e insolúveis tais como açúcares, pectinas e fibras. Como todos os produtos líquidos derivados de frutas são sistemas bifásicos compostos por partículas sólidas dispersas em um meio aquoso, o comportamento reológico destes também será influenciado pela concentração, composição química, tamanho, forma e distribuição das partículas que compõem a fase dispersa (COSTELL & DURAN, 1982).

O comportamento reológico de materiais cuja composição é constituída basicamente de água, além da presença de variados sólidos, solúveis e insolúveis, resulta da interação entre estes elementos que contribuem de forma isolada ou potencializada, quando combinados (QUEIROZ, 1998). Os sólidos insolúveis, por sua vez, têm influência importante sobre as propriedades reológicas de sucos e polpas (AMSTALDEN, 1996; BEZERRA, 1997; QUEIROZ, 1998) e a sua eliminação, total ou parcial, tem lugar na elaboração de processados com diferentes graus de turbidez.

Propriedades reológicas de diversos alimentos foram notificados e resumidos em muitas publicações (RAO & STEFFE, 1992; STEFFE, 1996; STEFFE et al., 1986; WEIPERT, 1993). No entanto, os valores publicados para os alimentos não podem ser precisos uma vez que fatores como variedade, maturação, métodos de processamento, composição, temperatura, tempo, as técnicas instrumentais e os métodos analíticos podem influenciar as propriedades reológicas (TABILO-MUNIZAGA & BARBOSA-CÁNOVAS, 2005).

2.3.1. CLASSIFICAÇÃO REOLÓGICA

Quanto à deformação, os fluidos podem ser divididos em dois tipos gerais (fig. 3):

- Reversíveis ou elásticos: são sistemas que não escoam; sua deformação é reversível e o sistema obedece à Lei de Hooke.

- Irreversíveis ou viscosos: são sistemas que escoam; sua deformação é irreversível e o sistema obedece à Lei de Newton, de viscosidade constante.

Também podem ser classificados quanto à relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento:

- Fluidos Newtonianos: sua viscosidade é constante, seguem a Lei de Newton da viscosidade. Esta classe abrange todos os gases e líquidos não poliméricos e homogêneos, por exemplo: água, leite, soluções de sacarose, óleos vegetais.

- Fluidos não-Newtonianos: a relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento não é constante.

Figura 3: Classificação dos Fluidos segundo seu comportamento reológico.

- Fluidos Newtonianos

As propriedades reológicas dos fluidos Newtonianos são independentes da taxa de deformação e do histórico anterior de cisalhamento, ou seja, a viscosidade é uma propriedade

do fluido e, sendo assim, somente uma função do estado do fluido (pressão, temperatura e composição) (BENNETT, 1978).

Inúmeros produtos alimentícios em forma de soluções aquosas, solução de sacarose, suco de frutas clarificadas, apresentam comportamento Newtoniano (RAO, 1986), no qual apresentam uma relação linear entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento com tensão inicial igual a zero (BIRD et al, 1960).

Óleos, bebidas alcóolicas, refrigerantes, leite, cervejas, vinhos, sucos clarificados de maçã e de uva apresentam comportamento Newtoniano desde que sejam submetidos a situações de taxa de deformação moderada (RAO & RIZVI, 1986; NAGY et al, 1993).

IBARZ et al (1987) analisaram o comportamento reológico dos sucos de maçã e pera, ambos com teor de sólidos solúveis ao redor de 70° Brix, e temperatura no intervalo de 5 a 60°C, resultando em um comportamento Newtoniano para todos os casos.

A equação matemática que descreve seu comportamento é dada por:

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

em que τ é a tensão de cisalhamento, $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação e η é a viscosidade absoluta.

- Fluidos não-Newtonianos

Todos os fluidos que não apresentam comportamento Newtoniano são classificados genericamente de fluidos não-Newtonianos. Os fluidos não-Newtonianos podem ser classificados em: viscoelásticos e inelásticos, e os fluidos inelásticos ainda podem ser: dependentes e independentes do tempo (fig. 4) (HOLDSWORTH, 1971).

Para os fluidos não-Newtonianos independentes do tempo, nos quais a temperatura e composição são constantes, a viscosidade aparente depende apenas da taxa de deformação ou

da tensão de cisalhamento. Os fluidos não-Newtonianos dependentes do tempo apresentam variação na viscosidade em função do tempo para uma taxa de cisalhamento constante.

Muitas aplicações de processamento e mistura de alimentos e seus derivados envolvem fluidos complexos. Um dos fenômenos que podem ocorrer em fluidos complexos é o desenvolvimento de uma tensão inicial. Normalmente a tensão inicial é a consequência de uma estrutura que está sendo gerada como resultado das interações partícula-partícula ou das interações macro-moleculares de agentes em suspensão.

O estudo da viscosidade dos sucos e purês de frutas tem recebido crescente atenção nos últimos anos e, segundo a maioria das investigações, os resultados apontam a natureza não-Newtoniana para a maioria destes, mostrando ocasionalmente, uma tensão inicial e/ou uma dependência com o tempo.

INDEPENDENTE DO TEMPO

Figura 4: Curvas de escoamento para fluidos independentes do tempo.

Fluidos Pseudoplásticos: Neste grupo esta a maioria dos fluidos de comportamento não-Newtoniano. São fluidos independentes do tempo que podem ou não possuir tensão inicial para começarem a escoar.

O fluido pseudoplástico apresenta suas cadeias em estado desordenado quando em repouso. Essas cadeias tendem a se alinhar paralelamente às linhas de corrente quando submetidas a uma tensão de cisalhamento diminuindo assim a resistência ao escoamento (HOLDSWORTH, 1971). Esses fluidos tendem a ter um comportamento Newtoniano a baixas taxas de cisalhamento devido à distribuição totalmente casual de suas cadeias e também em grandes taxas de cisalhamento devido ao alinhamento dos particulados (BEZERRA, 2000).

Nos fluidos pseudoplásticos a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento, isto é chamado de “cisalhamento fino”. Esta classe é representada por produtos como polpas e sucos concentrados de frutas, caldos de fermentação, melaço de cana (CHARM, 1960; HOLDSWORTH, 1971) e soluções de pectina (SARAVACOS & MOYER, 1967).

Segundo BRANCO (1995), sucos concentrados, não clarificados e congelados são exemplos típicos de fluidos pseudoplásticos que possuem tensão inicial.

Fluidos Dilatantes: São fluidos independentes do tempo e que também podem ou não possuir tensão inicial, os quais apresentam aumento da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento. No caso de suspensões, à medida que se aumenta a tensão de cisalhamento, o líquido intersticial que lubrifica a fricção entre as partículas é incapaz de preencher os espaços devido a um aumento de volume que frequentemente acompanha o fenômeno. Ocorre, então, o contato direto entre as partículas sólidas e, conseqüentemente, um aumento da viscosidade aparente.

Este comportamento é mais raro do que o pseudoplástico e é observado em fluidos contendo altos níveis de defloculantes como argila, lama, suspensões de amido, soluções de farinha de milho, soluções concentradas de goma e açúcares (ONOFRE, 1995).

Fluidos de Bingham: Os fluidos de Bingham são independentes do tempo, apresentando uma tensão inicial. Depois de superada essa tensão inicial, o fluido passa a apresentar uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação. São geralmente soluções ou suspensões concentradas de polímeros como são os casos de amido e proteína (VAN WAZER et al, 1963; MENJIVAR & RHA, 1980). Purê de batatas, mostarda, chocolate fundido são exemplos de fluidos que apresentam comportamento do tipo Bingham.

DEPENDENTE DO TEMPO

Figura 5: Curvas de escoamento para fluidos dependentes do tempo.

Alguns fluidos apresentam mudança na viscosidade em função do tempo sob condições constantes de taxa de cisalhamento. Há duas categorias a serem consideradas (fig. 5).

Fluidos Tixotrópicos: Esta classe de fluidos apresenta uma diminuição da viscosidade com o tempo de aplicação de uma taxa de cisalhamento constante, voltando a ficarem mais

viscosos quando esta cessa. O processo de rompimento das estruturas dos fluidos tixotrópicos depende do tempo, além de depender da taxa de deformação. Incluídos neste grupo estão os géis de alginato e sucos integrais concentrados, além do que a polpa de açaí (SKELLAND, 1967; TONON, 2009).

Nos escoamentos não-homogêneos de fluidos dependentes do tempo (normalmente denominados tixotrópicos), a dinâmica do escoamento se relaciona com a estabilidade ou integridade da rede estrutural do fluido (DERKSEN & PRASHANT, 2009).

DERKSEN & PRASHANT (2009) desenvolveram uma simulação de escoamentos complexos de fluidos tixotrópicos. O procedimento de simulação é baseado no método numérico de “Lattice-Boltzmann” para solução das equações de escoamento. O método é numericamente muito eficiente e permite simulações de alta resolução, as quais foram usadas para estudar escoamentos com elevados números de Reynolds (regime de transição e turbulento). O método de simulação foi aplicado em três casos: cisalhamento simples, escoamento plano de Poiseuille e escoamento em cavidade (lid-driven), e num último caso foi demonstrada a viabilidade da abordagem numérica para simular o escoamento em tanques de mistura contendo fluidos tixotrópicos. Uma questão preocupante em relação à simulação de fluidos não-Newtonianos é o aumento acentuado do número de parâmetros reológicos e consequente aumento da complexidade do modelo de caracterização do fluido; neste caso normalmente há a necessidade (experimental e/ou computacional) de determinar seus valores. Por esta razão, DERKSEN & PRASHANT (2009) optaram por limitar o número de parâmetros pela adoção de um modelo relativamente simples. O modelo tixotrópico adotado foi baseado nos trabalhos anteriores de MERRILL & STOREY (1958) E MOORE (1959), o qual foi revisado e aplicado por MUJUMDAR et al (2002) e FERROIR et al (2004). Neste modelo puramente viscoso (não-elástico), foi utilizado um número escalar λ que varia entre

0 e 1 o qual representa o nível da integridade estrutural da rede no fluido. Uma rede completamente desenvolvida, λ aproxima-se de 1 e indica alta viscosidade, λ próximo de zero indica baixa viscosidade. A equação de transporte é dada por:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} + u_i \frac{\partial \lambda}{\partial x_i} = -k_1 \dot{\gamma} \lambda + -k_2 (1 - \lambda) \quad (2)$$

em que u_i é a i -ésima componente da velocidade do fluido e $\dot{\gamma} = \sqrt{2 \mathbf{d}_{ij} \mathbf{d}_{ij}}$ é a taxa de deformação generalizada; $\mathbf{d}_{ij} = 1/2 [(\partial u_j / \partial x_i) + (\partial u_i / \partial x_j)]$ é o tensor da taxa de deformação. O primeiro termo na eq.(2) indica a quebra da rede devido a deformação do líquido, o segundo termo é responsável pela construção da rede com uma constante de tempo $1/k_2$. Neste modelo a viscosidade aparente η_a é conectada com a integridade da rede do fluido de acordo com:

$$\eta_a = \eta_\infty (1 + \alpha \lambda) \quad (3)$$

O fluido tixotrópico conforme definido pelas eqs. (2) e (3) possui quatro parâmetros: $k_1, k_2, \eta_a, \eta_\infty$.

Nos dois primeiros casos estudados (cisalhamento simples, escoamento plano de Poiseuille), foi obtida uma boa concordância entre os resultados numéricos e soluções semi-analíticas. O caso do fluxo de cavidade tipo “lid-driven” destaca as interessantes interações entre as escalas de tempo de fluxo (tempo de circulação) e escala de tempo relacionada à tixotropia. O completo potencial dos algoritmos foi mostrado nas simulações numéricas diretas do escoamento em um tanque de mistura no regime laminar e de transição.

Muitos fluidos complexos e alimentícios apresentam características tixotrópicas, por exemplo, aqueles que apresentam uma fase gasosa com a presença de bolhas de ar. Um sistema tixotrópico está associado a distribuição de bolhas e/ou partículas (STEFFE, 1996; BARNES,

1997) e suas características reológicas podem ser alteradas em função do tamanho e acomodação das bolhas no meio fluido.

Para quantificar a tixotropia desses fluidos, MIQUELIM & LANNES (2009) utilizaram de metodologias para investigar a influência da dinâmica oscilatória no módulo de elasticidade e na viscosidade do fluido. Perfis reológicos para a viscosidade, tensão de cisalhamento e tempo, foram produzidos para analisar a tixotropia em formulações de proteínas e gomas guar. Os autores observaram que a metodologia utilizada quantificou a tixotropia do fluido excluindo a influência da injúria na amostra típica de medidas reológicas rotacionais.

Fluidos Reopéticos: Este tipo de fluido apresenta um comportamento inverso ao dos tixotrópicos. Desta forma, a viscosidade destes fluidos aumenta com o tempo de aplicação de uma taxa de cisalhamento constante, retornando à viscosidade inicial quando esta cessa. São também conhecidos como fluídos de tixotropia negativa (GOVIER, 1972) ou anti-tixotrópicos (SKELLAND, 1967).

VISCOELÁSTICOS

O trabalho usado na deformação de um corpo perfeitamente elástico é recuperado quando o corpo retorna para sua forma original (VAN WAZER et al., 1963). Nos fluidos viscoelásticos tal recuperação é apenas parcial quando o trabalho for removido do material, devido ao fato desses fluidos apresentarem propriedades viscosas além das elásticas.

Um fluido viscoelástico pode ser dependente ou independente do tempo. Se suas propriedades viscosas sobressaírem perante às elásticas, este será um fluido viscoelástico independente do tempo, como é o caso das soluções poliméricas diluídas, nos quais a viscoelasticidade induz fatores de atritos menores. Caso contrário, os seus parâmetros

reológicos poderão depender da duração do cisalhamento e conseqüentemente apresentar dependência temporal, como é o caso de sistemas complexos como a clara de ovo natural (PELEGRINE, 1999).

2.3.2. MODELOS REOLÓGICOS

A descrição do comportamento reológico é feita por de modelos empíricos, que são usados para relacionar tensão de cisalhamento com a taxa de deformação, facilitando os cálculos em engenharia (BIRD, 1960). Devem-se preferir sempre os modelos mais simples, uma vez que são empíricos e somente poderão ser aplicados em intervalos da taxa de deformação de acordo com o experimento que gerou o ajuste do modelo.

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 dos equipamentos e dos processos. Dependendo do comportamento, o modelo utilizado possui ou não tensão inicial. Para os fluidos não-Newtonianos, os modelos são todos empíricos e representam o ajuste mais conveniente do reograma (BEZERRA, 2000).

A maioria dos alimentos fluidos não segue o simples modelo reológico Newtoniano no qual uma relação linear entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento é observada. Geralmente tais fluidos apresentam natureza não-Newtoniana, e as suas propriedades reológicas dependem da tensão aplicada sobre estes, a uma temperatura constante, podendo depender também da duração do cisalhamento (HOLDSWORTH, 1971).

Em outras palavras a maioria dos fluidos do gênero alimentício não são passíveis de serem caracterizados apenas pela viscosidade, já que esta não é constante, sendo necessários pelo menos dois parâmetros, portanto modelos mais complexos do que o da Lei de Newton.

Existem vários modelos utilizados para descrever o comportamento reológico, os quais podem ou não ser função da temperatura (BRANCO, 1995).- Estes modelos possuem parâmetros empíricos positivos, os quais podem ser avaliados numericamente pelo gráfico da tensão de cisalhamento versus a taxa de deformação a temperatura e pressão constantes (BIRD, 1960).

Os modelos mais aplicados na caracterização reológica são: Ostwald-de Waele (Lei da Potência), Herschel-Bulkey, Mizrahi-Berk e Casson. No modelo de Casson encontra-se o termo tensão inicial, o qual é importante no manejo, estocagem, processamento e transporte de suspensões concentradas na indústria (RAO & RIZVI, 1986). Tensão inicial é a tensão que deve ser aplicada para mover uma camada de fluido (CHARM, 1971) e ela reflete deformação e ruptura da estrutura da rede através do material.

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

O modelo de Ostwald-de-Waele, também conhecido como lei da Potência é bastante utilizado para descrever o comportamento de fluido não-Newtonianos (pseudoplásticos e dilatantes) devido sua simplicidade e por ser facilmente manuseável na forma logarítmica:

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \quad (4)$$

ou

$$\log \tau = \log K + n \log \dot{\gamma} \quad (5)$$

em que τ é a tensão de cisalhamento, $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação, K é o índice de consistência e “ n ” é o índice de comportamento.

A viscosidade aparente é expressa por:

$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = K(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (6)$$

Para $n=1$, esta equação se reduz à equação de Newton com $K = \eta$. Para valores de $n < 1$, a viscosidade aparente η_a decresce com o aumento da taxa de cisalhamento, caracterizando o fluido como pseudoplástico. Para valores de $n > 1$, a viscosidade aparente η_a aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento, caracterizando o fluido como dilatante.

O modelo de Ostwald-de-Waele foi utilizado por diversos pesquisadores para caracterizar o comportamento reológico das polpas, sucos e pures de frutas (GUNJAL & WAGHMARE, 1987; RAO et al., 1985; MANOHAR et al., 1990; VIDAL, 1997; ADORNO, 1998; PELEGRINE, 1999; LOMBRAÑA & DIAZ, 1985; SARAVAGOS, 1968; VARSHNEY & KUMBHAR, 1978). Entretanto nem sempre os dados experimentais são ajustados ao modelo de Ostwald-de Waele com grande precisão, pois em alguns alimentos a tensão inicial de escoamento também é uma propriedade importante, cuja determinação requer considerável cuidado. Também já foi observado que este modelo é mais adequado quando não se utilizam altas taxas de deformação (PELEGRINE, 1999).

Segundo HOLDSWORTH (1971), uma das falhas do modelo é que este prediz a viscosidade com valores infinitos e próximos de zero para taxas de deformações tendendo a zero e infinito, respectivamente.

MODELOS REOLÓGICOS COM TENSÃO INICIAL

Estes modelos são usados para fluidos que só iniciam o processo de escoamento quando a tensão de cisalhamento aplicada supera a tensão inicial (τ_0) que é própria desses materiais. Exemplos destes fluidos são: ketchup, mostarda, algumas polpas e purês de frutas.

É difícil determinar, para alguns alimentos, a tensão inicial τ_0 , devido à pequena magnitude desta. Por isso tal valor é frequentemente determinado por extrapolação dos dados de τ e $\dot{\gamma}$, de acordo com os vários modelos de escoamento, tais como os propostos por Herschel e Bulkley (1926), Casson (1959) e Mizrahi e Berk (1972) (TANGLERTPAIBUL & RAO, 1987; QUI & RAO, 1988). Dessa maneira o valor da tensão inicial τ_0 é geralmente um parâmetro de ajuste e não uma característica do material.

Abaixo são encontradas informações gerais sobre cada modelo mencionado:

- Modelo de Casson

Casson (1959) desenvolveu este modelo para escoamento de suspensões de partículas que interagem entre si em um meio Newtoniano, obtendo a seguinte expressão:

$$\tau^{1/2} = K_{oc} + K_c(\dot{\gamma})^{1/2} \quad (7)$$

em que τ é a tensão de cisalhamento, $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação, K_{oc} é a tensão inicial e K_c é a viscosidade plástica de Casson.

Segundo GERHKE (1996) este modelo tem sido utilizado para alimentos, especialmente para estimar a tensão inicial K_{oc} . O modelo de Casson tem sido adotado como método oficial para interpretar o comportamento reológico do chocolate pelo Instituto Internacional do Chocolate (RAO & RIZVI, 1986).

O modelo de Casson apresentou um bom ajuste dos dados para o purê de goiaba (VITALI & RAO, 1982). Segundo MIZHARI & FIRSTENBERG (1975) este modelo

apresentou melhor ajuste do que o modelo de Herschel-Bulkley para suco de laranja concentrado.

VIDAL (1997) utilizou o modelo de Casson para descrever o comportamento reológico da polpa de manga integral. VIDAL (2000) observou que o modelo de Casson melhor se ajustou aos dados reológicos da polpa de manga despectinada, em diferentes temperaturas. Entretanto, o Modelo de Casson não se adaptou a baixos valores da taxa de deformação quando aplicados a sucos de laranja e concentrados de tomate (MIZRAHI & BERK, 1971; RAO & COOLEY, 1982).

- Modelo de Herschel-Bulkley

Desenvolvido em 1926 por Herschel e Bulkley, o modelo de Herschel-Bulkley é uma forma modificada da Lei da Potência (RAO & COOLEY, 1982), a diferença entre os dois modelos é a presença da tensão inicial τ_0 no modelo de Herschel-Bulkley.

O modelo de Herschel-Bulkley possui 3 parâmetros e é representado pela seguinte equação:

$$\tau = \tau_0 + K_H(\dot{\gamma})^n \quad (8)$$

em que τ é a tensão de cisalhamento, $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação, τ_0 é a tensão inicial, K_H é o índice de consistência e n é o índice de comportamento. CRANDELL et al. (1982), utilizaram este modelo para descrever o comportamento reológico de suco de laranja concentrado.

- Modelo de Mizrahi-Berk

Com a intenção de descrever o comportamento reológico do suco de laranja concentrado, MIZRAHI & BERK (1971) desenvolveram um modelo reológico baseado no

modelo de uma suspensão de partículas interagindo em um meio pseudoplástico. Esta proposta é uma modificação do Modelo de Casson, o qual se reduz a este quando n_M for igual a 0,5.

$$\tau^{1/2} - K_{oH} = K_M (\dot{\gamma})^{n_M} \quad (9)$$

em que τ é a tensão de cisalhamento, $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação, K_{oH} é raiz quadrada da tensão inicial, K_M é o índice de consistência e n_M é o índice de comportamento.

MIZRAHI & BERK (1971) concluíram que este modelo representa melhor o comportamento reológico do suco de laranja concentrado do que os modelos de Casson ou de Herschel-Bulkley (BEZERRA, 2000).

2.4. TENSÃO SUPERFICIAL

A tensão superficial é uma propriedade física característica da interface líquido/sólido ou líquido/líquido e pode ser definida como o trabalho feito por uma unidade de área na geração de uma superfície no líquido sob condições isotérmicas. A origem dessa tensão na interface é devida às forças atrativas intermoleculares.

A figura 6 mostra o efeito das forças intermoleculares atuando sobre as moléculas na superfície e no interior do líquido. As moléculas situadas no interior do líquido (molécula B) são uniformemente rodeadas por moléculas, como resultado a força resultante agindo sobre elas é nula. As moléculas da superfície do líquido (molécula A), entretanto, sofrem apenas atração lateral e inferior, fazendo com que ocorra uma força resultante em direção ao interior do líquido. O efeito dessas forças intermoleculares agindo sobre as moléculas do líquido cria um estado de tensão na superfície conhecida como tensão superficial. A magnitude dessa força depende do par de fluidos em contato e da temperatura.

Figura 6: Forças que atuam sobre moléculas típicas no interior e na superfície do líquido.

Adaptado de PALMER, 1976.

Considerando o que acontece quando uma molécula sai do interior do líquido para a sua superfície. Na superfície do líquido a molécula tem uma maior energia potencial do que no interior do líquido. Esta diferença de energia, a temperatura constante, é igual ao trabalho realizado na criação de uma superfície do líquido, sob condições isotérmicas, ou seja, a tensão superficial do líquido (PALMER, 1976).

A tensão superficial γ como uma função de temperatura T é muitas vezes descrita pela equação de Eötvös (CHECHETKIN, 1970; FROLOV, 1979). De acordo com essa equação, a tensão superficial de vários líquidos diminui com o aumento da temperatura de acordo com a lei:

$$\gamma = \frac{K_0}{V_0^{2/3}} (T_{cr} - T) \quad (10)$$

em que V_0 é o volume molar do líquido, K_0 é a constante de Eötvös, T_{cr} é a temperatura crítica e T é a temperatura do líquido. Segue da eq.(10) que a constante K_0 é determinada pela equação:

$$K_0 = \gamma \frac{\mu^{2/3}}{(\rho^l)^{2/3} (T_{cr} - T)} \quad (11)$$

em que $V_0 = \mu/\rho^l$, ρ^l é a densidade do líquido e μ é a massa molecular. Da eq.(11), o coeficiente de temperatura pode ser representado na forma:

$$\frac{d\gamma}{dT} = \frac{K_0}{V_0^{2/3}} = \frac{K_0(\rho^l)^{2/3}}{\mu^{2/3}} \quad (12)$$

Utilizando a equação de Eötvös e a equação de Frenkel-Gubanov (FRENKEL & GUBANOV, 1946) pode-se dizer que o coeficiente de temperatura é dado por:

$$\frac{d\gamma}{dT} = C \quad (13)$$

Integrando esta equação:

$$\int_0^\gamma d\gamma = -C \int_{T_{cr}}^T dT \quad (14)$$

Obtém-se:

$$\gamma = C(T_{cr} - T) \quad (15)$$

em que C é uma constante que depende da natureza do líquido. Disso conclui-se que a tensão superficial diminui com o aumento da temperatura e depende das propriedades do líquido (MARKOV et al, 2007).

A adsorção, também decorrente da tensão superficial, é um fenômeno de fundamental importância na indústria. Nos processos com membranas (micro e ultrafiltração), um dos maiores problemas encontrados é a diminuição do fluxo com o tempo devido à formação da camada de polarização e do “fouling” junto à superfície da membrana. O processamento de fluidos lácteos, como leite e soro de leite por osmose reversa, ultrafiltração ou microfiltração é também afetado pelo “fouling” na membrana devido a uma combinação

de minerais e proteínas. Uma melhor compreensão destes mecanismos é necessária para otimizar as condições de processo e reduzir o “fouling” (CORNELISSEN, 1998; MICHALSKI, 1997).

A teoria termodinâmica da adsorção é baseada na equação de forças de Young (YOUNG, 1805) e na equação de energia de Dupré (DUPRÉ, 1869). A equação de Young relaciona as tensões superficiais do sólido γ_S do líquido γ_L , a tensão interfacial sólido-líquido γ_{SL} e o ângulo de contato do líquido na linha tripla sólido/líquido/ar (Figura 7):

$$\gamma_S = \gamma_{SL} + \gamma_L \cos \theta \quad (16)$$

Figura 7: Definição de ângulo de contato.

A Equação de Dupré relaciona as tensões superficiais do sólido γ_S do líquido γ_L , a tensão interfacial sólido-líquido γ_{SL} e introduz o conceito de trabalho de adesão W_a , ou seja, o trabalho necessário para separar o líquido do sólido:

$$W_a = \gamma_S + \gamma_L - \gamma_{SL} \quad (17)$$

Combinando a equação de Young com a equação de Dupré a equação de Young-Dupré é obtida:

$$W_a = \gamma_L(1 + \cos \theta) \quad (18)$$

em que o trabalho de adesão W_a é dado apenas em função da tensão superficial do líquido e do ângulo de contato.

A teoria termodinâmica de adsorção foi amplamente desenvolvida por diversos autores (GIRIFALCO & GOOD, 1957; FOWKES, 1964; DANN, 1970; VAN OSS et al, 1988). Estes autores demonstraram que a adesão é devida às forças eletrodinâmicas intermoleculares (Força de Van der Waals, pontes de hidrogênio), agindo nas interfaces líquido-líquido, líquido-sólido e sólido-sólido (MICHALSKI, 1997).

O valor do ângulo de contato θ indica se a superfície é hidrofóbica ou hidrofílica: um ângulo de contato grande corresponde a uma superfície hidrofóbica, enquanto que um pequeno ângulo de contato implica uma superfície hidrofílica (Figura 8). Muitos polímeros sintéticos têm superfícies hidrofóbicas, dando elevado ângulo de contato com a água, bem acima de 90° (KARBOWIAK, 2006).

Figura 8: Representação do ângulo de contato entre superfície hidrofílica (a) e hidrofóbica (b).

Em superfície hidrofílica (a) há a penetração espontânea dentro do poro; em contrapartida, na hidrofóbica (b) pressão é necessária para a introdução da gotícula no poro.

Segundo Cheryan (1998) a membrana ideal para fluxo aquoso são as de superfície hidrofílica, uma vez que, se o material for hidrofóbico, adsorverá componentes que são hidrofóbicos ou anfóteros, e isso pode causar o *fouling*. Por exemplo, muitas proteínas têm regiões hidrofóbicas dentro de sua estrutura que interagem com materiais hidrofóbicos (TREVISOLI, 2010).

Em caso de membranas porosas, a molhabilidade é determinada por três fatores: o tamanho dos poros, a tensão superficial do líquido e o trabalho de adesão do material da membrana (MOLISAK-TOLWINSKA et al, 1997). No início da filtração com uma membrana virgem, nem todos os poros estão molhados. Poros menores não estão envolvidos na filtração porque as forças de coesão entre as moléculas de água são mais fortes do que as forças de adesão na interface sólido-líquido, em outras palavras, a tensão superficial de líquido-sólido é menor do que a tensão superficial líquido-ar. Após a filtração com maiores pressões transmembrana, os poros menores são molhados e podem contribuir no desempenho da filtração. Tais resultados, também, podem ser explicados utilizando a equação de Washburn:

$$P = \frac{4k\gamma \cos \theta}{d_p} \quad (19)$$

em que P é a pressão transmembrana (Pa), k é um coeficiente que descreve a forma dos poros (assumindo poros ideais cilíndricos, $k = 1$), γ é a tensão superficial do líquido (N/m), θ é o ângulo de contato e d_p é diâmetro dos poros (m). Assumindo que k , γ e θ são constantes, o diâmetro dos poros molhados depende apenas da pressão. Com pressões mais altas poros menores são “abertos”. Outra forma de atingir os poros menores é diminuir a tensão superficial do líquido, agentes umectantes com uma baixa tensão superficial podem ser utilizados com este propósito. Álcoois e acetona podem penetrar mais facilmente na estrutura da membrana e molhar os poros menores (KOCHAN et al, 2009).

Bailey et al. (2000) investigaram a ultrafiltração do suco de uva utilizando membranas hidrofóbicas. Eles verificaram que a ultrafiltração resultou em um aumento da tensão superficial do suco com conseqüente redução na tendência de molhamento da membrana, diminuindo assim a eficiência do processo.

Kochan et al (2009) estudaram o impacto de diferentes agentes umectantes na ultrafiltração utilizando membranas poliméricas, para tal caracterização e investigação foram escolhidas membranas poliméricas em geometria de placas (PS) e de geometria tubular tipo fibras ocas (PES). Os agentes umectantes são utilizados para reduzir o ângulo de contato das membranas a fim de obter maiores fluxos transmembrana e conseqüente diminuição na formação do fouling, os agentes umectantes utilizados neste trabalho foram: isopropanol (IPA), etanol (EtOH) e acetona. Durante a filtração de água pura foram utilizados os seguintes valores de fluxo do permeado: 15 L/m² h, 30 L/m² h, 15 L/m² h, 50 L/m² h e com repetição no valor de 15 L/m² h. Os valores foram alterados a cada 30 minutos, ou seja, a medida da permeabilidade para o fluxo de 15 L/m² h foi repetida a cada 90 minutos. A cada medida feita com o fluxo de 15 L/m² h foi observado um aumento da permeabilidade, tal fenômeno pode ser explicado pela molhabilidade da membrana. Na análise do impacto dos agentes umectantes diferentes soluções foram utilizadas, ou seja, lodo sobrenadante, soro bovino (BSA) e solução de dextrana foram filtrados em membranas com os agentes umectantes e em membranas virgens a fim de observar a variação da permeabilidade. Observou-se que para a filtração de água pura os solventes orgânicos escolhidos apresentaram um efeito sobre a permeabilidade da membrana. Isopropanol e etanol tendem a ter impacto semelhante na melhora do fluxo quando água pura é filtrada, mas para o lodo sobrenadante, o soro bovino (BSA) e a solução de dextrana os agentes umectantes não apresentaram um impacto significativo sobre o fouling, verificando que os agentes umectantes não têm qualquer contribuição positiva nos termos de melhoria da filtração (KOCHAN et al, 2009).

2.5. ESPECTROSCOPIA DE ATENUAÇÃO ACÚSTICA

A Espectroscopia de atenuação acústica é uma das mais promissoras técnicas de medição para caracterização de emulsões e suspensões em um grande intervalo de concentrações e tamanhos de partículas. Em comparação aos métodos ópticos, esta técnica possui grandes vantagens, pois pode ser usada para analisar emulsões bastante concentradas e opticamente opacas sem a necessidade de diluição da amostra. Além disso, oferece uma oportunidade para estudar sistemas de partículas no seu estado original de dispersão, facilitando a determinação de aglomeração ou parâmetros de floculação (ALBA et al, 1999; BABICK & RIPPERGER, 2002).

A espectroscopia de atenuação acústica para a medida do tamanho de partículas de suspensões e emulsões consiste na medida da atenuação de ondas de ultra-som no intervalo de frequência de 1 MHz até 160 MHz através da amostra. Tal faixa de frequência é obtida usando dois pares de transdutores de banda larga de ultra-som. A atenuação medida da onda de ultra-som como função da frequência é conhecida como espectro de atenuação acústica e constitui uma assinatura particular para a suspensão ou emulsão no sentido de que há uma correspondência entre a distribuição do tamanho de partículas e o espectro associado (ALBA et al, 1999; DUKHIN et al, 2000; KACHANOVSKAYA et al, 1996; MCCLEMENTS, 1996).

Há seis mecanismos conhecidos (fig. 9) de interação da onda de ultra-som com um sistema disperso: (1) absorção (α_{ab}), (2) espalhamento (α_{sc}), (3) viscoso (α_{vis}), (4) térmico (α_{th}), (5) estrutural (α_{str}) e (6) eletrocinético (α_{ele}).

- (1) **Absorção:** O mecanismo de absorção da energia acústica ocorre devido à interação da onda sonora com as partículas e com o meio. Seu efeito é independente do tamanho das partículas e também independente da frequência do som.

- (2) **Espalhamento:** O mecanismo de espalhamento do som é semelhante ao espalhamento da luz. As partículas simplesmente redirecionam uma parte da energia acústica. Esse mecanismo é importante para partículas grandes (maiores que 3mm) e alta frequência (maior que 10MHz).
- (3) **Viscoso:** As perdas viscosas da energia acústica ocorrem devido às ondas de cisalhamento geradas pela oscilação das partículas. Estas ondas de cisalhamento aparecem por causa da diferença de densidade entre as partículas e o meio, esta diferença de densidade causa o movimento das partículas com relação ao meio. Como resultado, camadas do líquido próximas à partícula deslizam entre elas. Este movimento deslizante não-estacionário das camadas de líquido próximas à partícula é conhecido como onda de cisalhamento. Perdas viscosas são dominantes para pequenas partículas rígidas com tamanhos inferiores a 3 mm.
- (4) **Térmico:** As perdas térmicas são devidas ao gradiente de temperatura gerado perto da superfície da partícula. Este gradiente de temperatura é devido ao acoplamento termodinâmico entre a pressão e a temperatura. Este mecanismo é dominante para partículas moles.
- (5) **Estrutural:** Perdas estruturais são causadas pela oscilação da rede de partículas que estão interligadas. Assim, esse mecanismo é específico para um determinado tipo de sistema estruturado.
- (6) **Eletrocinético:** Perdas Eletrocinéticas são causadas pela oscilação de partículas carregadas em um campo acústico o qual leva à geração de um campo elétrico alternado e, conseqüentemente, uma corrente elétrica alternada. Como resultado, uma parte da energia acústica é transformada em energia elétrica e, em seguida, de forma irreversível em calor.

Figura 9: Mecanismos de atenuação acústica.

Apenas os quatro primeiros mecanismos (absorção, espalhamento, viscoso e térmico) tem uma significativa contribuição para o espectro geral de atenuação na maioria dos casos. Perdas estruturais são significativas apenas em sistemas estruturados que exigem um quadro teórico diferente. A contribuição das perdas eletrocinéticas para a atenuação total do som é quase sempre insignificante e geralmente é negligenciada. Estes quatro mecanismos formam a base para a espectroscopia de atenuação acústica. A atenuação total medida é igual à soma desses quatro mecanismos (DUKHIN et al, 2000):

$$\alpha = \alpha_{ab} + \alpha_{sc} + \alpha_{vis} + \alpha_{th} \quad (20)$$

A teoria acústica mais conhecida para sistemas heterogêneos foi desenvolvida por Epstein & Carhart (1953) e Allegra & Hawley (1972), a qual considera os quatro mais importantes mecanismos de atenuação (absorção, espalhamento, viscoso e térmico) e é conhecida como “Teoria ECAH”. Os autores mostraram que estes mecanismos de atenuação podem ser caracterizados pelas equações fundamentais baseadas nas Leis de conservação de massa, energia e quantidade de movimento, nas equações de estado termodinâmicas e na

relação tensão-deformação para sólidos isotrópicos elásticos e fluidos viscosos; isto é, pela formulação das equações de onda que descrevem a interação entre as ondas sonoras e as partículas. Desta forma, o espectro de atenuação associado a qualquer distribuição de tamanho de partículas e concentração de partículas pode ser previsto para qualquer suspensão ou emulsão, desde que o conjunto de propriedades termodinâmicas, mecânicas e de transportes sejam conhecidas para ambas as fases dispersa e contínua. Em geral, a teoria ECAH precisa da informação sobre três propriedades termodinâmicas: condutividade térmica κ , calor específico c_p e coeficiente de expansão térmica β . Acontece que κ e c_p são quase os mesmos para todos os líquidos, exceto água (ALBA et al, 1999; DUKHIN et al, 2000).

Esta teoria assume que todas as partículas sejam esféricas e possui o mesmo tamanho. Extensões da teoria ECAH para incluir polidispersão têm assumido normalmente uma superposição linear simples da atenuação para cada fração de tamanho. Tal teoria é válida somente para partículas isoladas imersas em um meio infinito, ou seja, sistemas muito diluídos. Para um sistema com um número de partículas, a atenuação total do som causada por todas as partículas é calculada como a adição da contribuição de cada partícula (DUKHIN et al, 2000; LIU, 2009).

Tal teoria possui uma grande desvantagem por ser matematicamente complexa, a qual não pode ser generalizada para as interações partícula-partícula. Isso pode não ser importante para emulsões, mas pode ser importante para látex e é certamente muito importante para sistemas de alto contraste de densidade. Há duas maneiras de simplificar esta teoria usando uma restrição sobre a frequência e o tamanho das partículas. O primeiro é o chamado “regime de ondas longas” (ALLEGRA & HAWLEY, 1972), que exige que o comprimento de onda λ seja maior do que o raio da partícula a . Esta exigência restringe o tamanho de partícula para um determinado conjunto de frequências. A experiência dos autores mostra que tamanho de

partículas deve ser inferior a 10 mm para a faixa de frequência de 1-100 MHz. Esta restrição é útil para a caracterização de partículas pequenas (DUKHIN et al, 2000).

Ao restringir a frequência e tamanho das partículas pode-se usar a mais simples expressão explícita para as perdas térmicas α_{th} obtida inicialmente por Isakovich (CATTON, 1953) e confirmado mais tarde por Epstein e Carhart (1953), e Allegra e Hawley (1972):

$$\alpha_{th} = \frac{3\varphi T c_m \rho_m \kappa_m}{2a^2} \left(\frac{\beta_m}{\rho_m C_p^m} - \frac{\beta_p}{\rho_p C_p^p} \right)^2 \operatorname{Re} \left(\frac{1}{1-jz_m} - \frac{\kappa_m \tanh z_p}{\kappa_p (\tanh z_p) - z_p} \right) \quad (21)$$

com,

$$z = (1+j)a \sqrt{\frac{\omega \rho C_p}{2\tau}} \quad (22)$$

em que j é o número imaginário, φ é a fração de volume, T é a temperatura absoluta, ω é a frequência angular, c é a velocidade do som, ρ é a densidade, κ é a condutividade térmica, β é o coeficiente de expansão térmica, C_p é o calor específico à pressão constante e o índice m corresponde ao meio enquanto que o índice p corresponde as partículas.

Outra forma de simplificar esta teoria foi feita por Dukhin & Goetz (1996) com base no "modelo de fase acoplada" (GIBSON & TOKSOZ, 1989; HARKER & TEMPLE, 1988). Esta teoria expressa o número complexo de onda l assumindo as perdas viscosas como o único mecanismo de interação das partículas com a onda sonora:

$$\frac{l^2 M^*}{\omega^2} = \frac{\rho_m (1-\varphi) + \rho_p \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i \gamma_i}{j \omega \rho_p \varphi_p + \gamma_i}}{(1-\varphi)^2 + \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i (\varphi-2) \gamma_i + \varphi_i^2 (1-\varphi) \rho_m}{j \omega \rho_p \varphi_p - \gamma_i}} \quad (23)$$

em que

$$\gamma = \frac{9\eta\varphi\Omega}{2a^2} \quad (24)$$

e

$$F_f = 6\pi\eta a\Omega(u_p - u_m) \quad (25)$$

em que η é a viscosidade dinâmica, u_p e u_m são as velocidades, respectivamente, das partículas e do meio utilizando o laboratório como referencial, Ω é o coeficiente de arrasto, M^* é o módulo de “stress” que pode ser expresso em termos da densidade e velocidade de som da seguinte forma:

$$M^* = \frac{\rho_p \rho_m c_p^2 c_m^2}{\varphi \rho_m c_m^2 + (1-\varphi) \rho_p c_p^2} \quad (26)$$

Utilizando a eq. (23) obtém-se o valor das perdas viscosas:

$$\alpha_{vis} = Im \, l \quad (27)$$

Esta teoria pode ser usada também para calcular a velocidade do som das dispersões nas quais as perdas viscosas são dominantes:

$$c_s = \frac{\omega}{Re \, l} \quad (28)$$

Experimentos realizados por Dukhin et al (1999) confirmam a validação desta teoria para a velocidade do som.

Expressões para o cálculo das perdas por absorção α_{ab} e espalhamento α_{sc} , para o limite de ondas longas, foram descritas por McClements (McCLEMENTS, 1991, 1992, 1994; WATERMAN & TRUELL, 1964). O autor usou o termo “dispersores sem perdas” para descrever a propagação do som quando os mecanismos de perdas viscosas e térmicas são negligenciados. A absorção em tais sistemas pode ser expressa por (DUKHIN et al, 1996):

$$\alpha_{ab} = \frac{(1-\varphi) \frac{\alpha_m}{c_m} + \varphi \frac{\rho_m \alpha_p}{\rho_p c_p}}{\sqrt{\frac{(1-\varphi)}{c_m^2} + \frac{\varphi \rho_m}{\rho_p c_p^2}}} \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_m}} \quad (29)$$

em que α_m e α_p são as atenuações, respectivamente, do meio e da partícula.

O coeficiente de espalhamento por ser calculado utilizando a teoria de Waterman–Truell (1964), a qual fornece a expressão para o número de onda complexo l_s associado ao espalhamento:

$$\frac{l_s^2}{l_m^2} = \left(1 - \frac{3j\varphi}{(l_m a)^3} A_0\right) \left(1 - \frac{9j\varphi}{(l_m a)^3} A_1\right) \quad (30)$$

em que A_0 e A_1 são os coeficientes de monopolo e dipolo do espalhamento calculadas para uma única partícula,

$$l_s = \frac{\omega}{c_s} + j\alpha_{sc} \quad (31)$$

$$l_m = \frac{\omega}{c_m} + j\alpha_m \quad (32)$$

A expressão para o espalhamento em termos da densidade e da velocidade do som pode ser derivada das eqs. (30) e (31) para um espalhamento simples:

$$\alpha_{sc} = \frac{\varphi \omega^4 \alpha^3}{2c_m^4} \left[\frac{1}{3} \left(1 - \frac{\rho_m c_m^2}{\rho_p c_p^2}\right)^2 + \left(\frac{\rho_p - \rho_m}{2\rho_p + \rho_m}\right)^2 \right] \quad (33)$$

Pode-se ver que o espalhamento depende fortemente da frequência. De acordo com Waterman & Truell (1964) o termo do espalhamento é importante para partículas grandes (maiores que 3mm) e alta frequência (maior que 10MHz).

Emulsões de alimentos são uma aplicação muito importante para a espectroscopia de atenuação acústica. Estas emulsões são bastante concentradas o que elimina as técnicas tradicionais baseadas na emissão de luz para fins de caracterização. Ainda mais que a diluição da amostra não é adequada em caso de emulsões porque destrói a distribuição original das gotículas (DUKHIN et al, 2000).

O tamanho de partícula influencia fortemente as forças hidrodinâmicas que atuam sobre as partículas e, assim, a deposição das partículas sobre a superfície da membrana utilizada na filtração (ALTMANN & RIPPERGER, 1997; RIPPERGER, & GREIN, 2007).

Dukhin et al. (2005) utilizaram um espectrômetro acústico que trabalha entre 3 e 100 MHz, e mediram a atenuação do som em amostras de produtos lácteos (leite, manteiga) com diferentes concentrações de gordura e em função da temperatura. Segundo os autores, devido às propriedades das amostras, para frequências acima de 50 MHz as perdas intrínsecas são predominantes em relação às perdas térmicas (sendo as perdas viscosas desprezíveis), sugerindo que essa faixa de frequência seria mais adequada para medir a atenuação sem os efeitos de variação do tamanho de partículas.

McClements et al (1989) mediram a velocidade e atenuação do ultra-som de uma emulsão de alimentos (molho de salada) em várias concentrações de óleo (0-35% w/w) e tamanho médio de gota (0,55 e 10,2 μm) em uma faixa de frequências (1,25-10 MHz), utilizando uma técnica de pulso-eco ultra-sônico na 20°C. Os autores obtiveram uma boa concordância entre as concentrações conhecidas de óleo das emulsões e aquelas determinadas usando as medições da velocidade do som. A concordância entre as medidas e os coeficientes de atenuação previstos pela teoria não foi tão boa quanto para a obtida com as medições da velocidade do som, isto é em parte devido ao grande erro experimental nas medições da atenuação e em parte devido ao efeito de espalhamento múltiplo. A técnica foi capaz de realizar medidas rápidas e precisas, sendo não-destrutiva, não-invasiva e não-intrusiva, e podendo ser utilizada em sistemas que são concentrados ou opticamente opacos.

Kühnl et al (2010) investigaram o impacto das interações coloidais sobre o fluxo da microfiltração tangencial de leite em diferentes valores de pH. Para tal investigação a medida da distribuição do tamanho de partículas utilizando a técnica de espalhamento de luz foi

realizada para a faixa de pH entre 5,9 e 6,8 a 20° C. Foi encontrado que a distribuição de tamanho de micelas de caseína em pH 5,9; 6,2; 6,5 e 6,8 teve um valor médio de 180nm. Como o tamanho da micela permanece constante no intervalo de pH de 5,9 a 6,8, o impacto observado do pH sobre a distribuição de fluxo é devido à mudança nas interações coloidais ao invés de uma alteração nas forças hidrodinâmicas.

3. Materiais e Métodos

3.1. MATÉRIA PRIMA

Os experimentos foram realizados utilizando-se 04 (quatro) marcas diferentes de polpas de açaí tipo médio comercializadas na cidade de São Carlos. Após descongelamento, as amostras foram cuidadosamente homogenizadas com um agitador magnético antes de executar as medidas.

Cabe ressaltar que, segundo os padrões de identidade e qualidade fixados na Instrução Normativa nº 01 de 07/01/2000, a polpa de açaí médio ou regular (tipo B) contém de 11% a 14% de sólidos totais (BRASIL, 2000).

Para a realização dos testes com a polpa diluída foi utilizada água destilada para a diluição das polpas. A proporção seguida na diluição foi de 1kg de polpa de açaí para 3L de água destilada.

3.2. ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DA POLPA

As amostras de polpa e polpa diluída de açaí foram analisadas quanto ao pH, condutividade elétrica e tensão superficial.

3.2.1. pH

A determinação do pH é um processo eletrométrico que avalia a concentração de íons hidrogênio na amostra. Para isso, foi utilizado um pHmetro da marca ORION (Modelo 210 A plus, precisão $\pm 0,01$). O aparelho foi calibrado com soluções tampão de pH 4 e 7 da marca Nalgon e em seguida foi feita a leitura direta do pH da polpa diluída e pura, com a imersão do eletrodo no béquer contendo a amostra. Todas as análises foram feitas na temperatura ambiente e cada medida foi feita em triplicata, no qual o resultado final corresponde à média dessas medidas.

3.2.2. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

A medida da condutividade elétrica foi realizada utilizando condutivímetro da marca ORION (Modelo 105 A plus, precisão ± 10). O aparelho foi calibrado com solução padrão de $1412\mu\text{S}$ da marca Digimed e em seguida foi feita a leitura direta da condutividade elétrica da polpa diluída e pura, com a imersão do eletrodo no béquer contendo a amostra. Todas as análises foram feitas na temperatura ambiente e cada medida foi feita em triplicata, no qual o resultado final é a média dessas medidas.

3.2.3. TENSÃO SUPERFICIAL

Para as medidas da tensão superficial das amostras de polpas de açaí pura e diluída foi utilizado o tensiômetro da Sensadyne (modelo QC6000) (Figura 10). Para controle de temperatura foi utilizado um banho termostático da marca TECNAL modelo TE-2000. As leituras foram feitas no intervalo de temperatura entre 15°C a 60°C .

Figura 10: Tensiômetro da Sensadyne (modelo QC6000).

O método para medição da tensão superficial utilizado pelo equipamento da SensaDyne Instruments é o método da máxima pressão de bolha. Este método é completamente independente da profundidade de imersão e trabalha com dois capilares de diâmetros diferentes onde é bombeado um gás inerte (nitrogênio). Os capilares são imersos no fluido e a pressão dentro das bolhas é medida por um transdutor de pressão. O bombeamento do nitrogênio através desses dois capilares produz um diferencial de pressão que é diretamente proporcional à tensão superficial do fluido.

Um diagrama esquemático deste método de medida pode ser visualizado na figura 11. Subtraindo a pressão do orifício maior (r_2) da pressão do orifício menor (r_1) é obtida a diferença de pressão (ΔP), a qual é diretamente proporcional à tensão superficial do fluido.

Figura 11: Diagrama esquemático do método da máxima pressão de bolha.

A utilização de dois capilares de diâmetros diferentes elimina a interferência de componentes hidrostáticos (a diferença de densidade entre o líquido e o gás multiplicada pela aceleração da gravidade e a profundidade de imersão capilar), que o tensiômetro de um capilar não consegue eliminar. O capilar de maior diâmetro mede o efeito da profundidade de imersão (elimina componentes hidrostáticos) e o valor da pressão máxima da bolha do capilar menor é a tensão superficial.

3.2.4. ESPECTROSCOPIA DE ATENUAÇÃO ACÚSTICA

A verificação da atenuação e da alteração do tamanho de partículas das amostras de polpa pura e diluída de açaí e das amostras que sofreram tratamento enzimático em comparação às amostras de polpa de açaí sem tratamento enzimático foi realizada via técnica de espectroscopia de atenuação acústica utilizando o APS-100 (fig. 12) (Matec Applied Science, Northborough, USA).

O equipamento projetado pela MATEC (APS-100, Analysis Particle Size) (Figura 12) possui uma fonte de ultrassom e registra medidas de atenuação acústica (dB/cm - decibéis/centímetro) em função da frequência do som no intervalo de 1 a 100 MHz. Simultaneamente, a instrumentação registra a velocidade do som em função da frequência, como também o percentual de particulados, pH, condutividade e temperatura.

Figura 12: APS-100 da Matec Applied Science.

O programa do APS-100 extrai dados de uma matriz contendo parâmetros (propriedades) da partícula e do solvente para calcular o tamanho das partículas em suspensão a partir da atenuação acústica. As propriedades físicas fundamentais do soluto (partículas) e do solvente (fase continua) que devem ser inseridas no programa são, dentre outras, densidade, calor específico, condutividade térmica e coeficiente de expansão térmica.

Algumas dessas propriedades como calor específico (C_p), difusividade térmica (α) e condutividade térmica (κ) foram determinadas em amostras de polpa de açaí no Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL) em Campinas. Para determinação do calor específico foi utilizada a metodologia adaptada de Hwang & Hayakawa (1979) na faixa de temperatura de

10 a 80°C. Para a difusividade térmica foi utilizada a metodologia adaptada de Dickerson (1965) na faixa de temperatura de 10 a 80°C e a condutividade térmica calculada após conhecimento das demais propriedades ($\kappa = \rho \cdot \alpha \cdot C_p$).

A densidade foi determinada utilizando a técnica de deslocamento de fluidos em picnômetro segundo método oficial 985.19 da AOAC (1995) e o coeficiente de expansão térmica foi calculado com base em dados experimentais da densidade de polpa de açaí em função da temperatura.

As propriedades definidas da polpa de açaí foram incluídas na matriz do APS 100 e as análises realizadas com aproximadamente 150 mL de amostra.

Para realização das medidas foram utilizadas amostras de polpa de açaí tipo médio da marca 1(um) e amostras de polpa de açaí tratada enzimaticamente com Pectinex Ultra SP-L, Biopectinase KK Plus e Ultrazym AFPL na concentração de 500 mg/kg de polpa. O tratamento enzimático foi realizado individualmente para cada enzima na temperatura de 35°C durante 30 minutos.

3.3. DADOS REOLÓGICOS

As medidas reológicas das diferentes marcas de polpa de açaí, na forma pura e diluída, foram realizadas mediante o emprego dos reômetros rotacionais da marca Brookfield (Rheometer DVIII+) (Fig. 13). Os reômetros rotacionais foram acoplados a um banho termostático da marca TECNAL modelo TE-2000, permitindo assim realizar medidas reológicas nas temperaturas de: 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C.

Figura 13: Reômetros rotacionais da marca Brookfield (Rheometer DVIII+) com a geometria:

a) Cilindros concêntricos; b) Cone-placa.

O reômetro foi conectado a um microcomputador para controlar sua operação, registrando a cada 20s os dados de temperatura, tensão de cisalhamento, taxa de deformação e viscosidade aparente. As séries de medidas experimentais foram realizadas tomando 90 pontos na taxa de deformação, sendo, primeiramente, 30 pontos para velocidade de rotação crescente (1º ciclo crescente), em seguida 30 pontos para velocidade de rotação decrescente (1º ciclo decrescente) e novamente mais 30 pontos para velocidade de rotação crescente (2º ciclo crescente). Os experimentos foram realizados em triplicata, utilizando para cada repetição uma nova amostra.

Os sistemas de medidas utilizados para a polpa de açaí na forma pura foram os cilindros concêntricos e o de cone-placa. Para a polpa diluída foi utilizado apenas o de cone-placa, pois o de cilindros concêntricos não era ideal para medir este tipo de amostra, pois ele

apresentava valores, para a polpa diluída de açaí, abaixo do recomendado pelo manual do equipamento. Ambos os sistemas de medidas são descritos a seguir.

- Reômetro de Cilindros Concêntricos

Figura 14: Desenho esquemático do reômetro de cilindros concêntricos.

O sistema de cilindros concêntricos (Fig. 14) é equipado com dois cilindros de diâmetros diferentes o qual utiliza 8mL de amostra, cujo cilindro interno é rotacional e o externo é fixo e a medida baseia-se na determinação do torque no próprio cilindro interno. Neste sistema de medida, a taxa de cisalhamento variou de 0 até 200 s^{-1} . Para a realização das medidas foi utilizado o spindle SC4-18.

- Reômetro de Cone-Placa

Figura 15: Desenho esquemático do reômetro de cone-placa.

O sistema de cone-placa consiste essencialmente de uma placa plana e um cone invertido (Figura 15), cujo vértice encontra-se muito próximo a placa. O cone invertido é rotacional e a placa é fixa e a medida baseia-se na determinação do torque no próprio cone. A taxa de cisalhamento variou de 0 até 200 s^{-1} e foi utilizado o spindle CP-42.

No sistema de cone-placa é possível selecionar a distância (*gap*) entre o cone e a placa, por esse motivo foi feito um estudo prévio para determinar qual o melhor *gap* para cada marca de polpa de açaí. Após este estudo, foi utilizado o *gap* mais apropriado para cada marca.

3.4. PROCESSAMENTO DE RESULTADOS

Os gráficos foram feitos utilizando o software Origin 7.5 e a segunda curva crescente de taxa de deformação obtida foi ajustada aos modelos reológicos utilizando o software Statistica 5.0. Os modelos utilizados foram a Lei da Potência e o Herschel-Bulkley e o coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado como parâmetro de ajuste dos dados experimentais aos modelos.

3.5. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA COMO FERRAMENTA PARA AUXILIAR NA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSAMENTO DE SUSPENSÕES DE AÇAÍ VIA MICROFILTRAÇÃO TANGENCIAL

A partir da definição dos parâmetros de medição da polpa pura e polpa diluída de açaí, a análise do comportamento reológico foi utilizada como ferramenta na tomada de decisão do melhor pré-tratamento enzimático da polpa de açaí para posterior microfiltração tangencial utilizando membranas cerâmicas.

Para tal, foram utilizadas amostras de polpa de açaí tratadas com os preparados enzimáticos comerciais Pectinex Ultra SP-L (Novozymes - Bagsvaerd, Dinamarca), Biopectinase KK Plus (Kerry Bio-Science) e Ultrazym AFPL (Novozymes - Bagsvaerd, Dinamarca).

Nos ensaios de hidrólise enzimática, a polpa foi descongelada e aquecida a 35°C e em seguida foram adicionadas as enzimas nas concentrações de 500 mg/kg de polpa pura. A polpa foi mantida em banho-maria a temperatura de 35°C durante 120 minutos e em seguida analisada em reômetro da Brookfield com a geometria de cone-plana. Com os parâmetros definidos neste estudo também foram realizadas medições do comportamento reológico de amostras originadas de estudos no NETeF que tiveram como objetivo central a utilização da tecnologia de microfiltração para obtenção de suco clarificado de açaí.

A análise das variações de viscosidade foi realizada na polpa de açaí diluída (controle) e que foi a suspensão de alimentação do processo, no retentado e no permeado.

Figura 16: Desenho esquemático da bancada experimental de microfiltração.

Pode-se observar na figura 16 os principais elementos da bancada experimental de microfiltração utilizada na obtenção das amostras de permeado e retentado: tanque de parede dupla para armazenagem da polpa diluída e controle de temperatura, bomba de deslocamento positivo, rotâmetro, manômetro, módulo com membrana tubular. A pressão no módulo de filtração é controlada com um registro instalado no final do circuito hidráulico.

As microfiltrações foram conduzidas utilizando membranas cerâmicas tubulares de porosidade nominal no valor de 0,2 μm e 0,8 μm . Vários processos foram estudados com a instrumentação e maiores detalhes encontram-se em várias publicações (DEL COLLE, 2005; QUEIROZ, 2004; HANEDA, 2010; TREVISOLI, 2010).

A análise do comportamento reológico do permeado e do retentado foi feita utilizando o reômetro rotacional da marca Brookfield com a geometria de cone-plana, na temperatura de 25°C.

4. Resultados e Discussões

4.1. pH E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Os resultados de pH e condutividade elétrica determinados para a polpa pura e diluída de açaí para as diferentes marcas utilizadas neste trabalho se encontram na tabela 1.

Tabela 1: pH e condutividade elétrica da polpa de açaí pura e diluída.

	Marca 1		Marca 2		Marca 3		Marca 4	
Parâmetros	Pura	Diluída	Pura	Diluída	Pura	Diluída	Pura	Diluída
pH ($\pm 0,01$)	4,81	5,01	4,82	4,99	5,08	5,15	4,95	5,06
Condutividade Elétrica (μS) (± 10)	1551	1325	1672	1485	1550	1433	1545	1390

Pode-se ver que, para todas as marcas de açaí estudadas, houve um aumento do pH com a diluição da polpa, ou seja, a adição de água tornou a amostra menos ácida. A diluição da amostra também alterou o valor da condutividade elétrica, a polpa de açaí diluída apresentou um valor menor da condutividade elétrica com relação à polpa pura.

4.2. TENSÃO SUPERFICIAL

Na Figura 17 são apresentados os gráficos da tensão superficial (N/m) em função da temperatura para a polpa pura (Fig.17a) e polpa diluída (Fig.17b) de diferentes marcas, conforme especificadas respectivamente na legenda de cada figura.

Os resultados representados por linhas contínuas são decorrentes do ajuste a centenas de valores discretos medidos em intervalos de tempo de 1 segundo pelo equipamento Sensadyne - modelo Q6000.

Figura 17: Gráfico da Tensão Superficial (N/m) em função da temperatura (Celcius). (a)

Polpas Puras; (b) Polpas diluídas.

Observa-se em geral para fluidos puros, que a relação entre a tensão superficial (γ , N/m) é inversamente proporcional à temperatura, ou seja, com o aumento da temperatura ocorre uma diminuição da tensão superficial. Porém essa relação não é observada para todo fluido, principalmente tratando-se de um fluido de composição complexa.

Quando se adiciona energia ao fluido, promovendo aumento de temperatura, a tensão superficial diminui. Observa-se na Fig.17a, que inicialmente para a polpa pura esse comportamento é observado, no entanto vemos na Fig.17a que para valores de temperatura maiores que 45°C, a tensão superficial apresenta um aumento com o aumento da temperatura para as polpas da marca 1 e 2. Como a polpa de açaí apresenta um elevado percentual de lipídeos, proteínas e minerais, assim como quantidades consideráveis de fibra alimentar o aumento da temperatura pode ter degradado algum composto termo-sensível, modificando a composição do fluido complexo, fazendo com que ocorresse o aumento da tensão superficial.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por outro lado, para a polpa diluída a tendência frequente é obedecida, ou seja, todas as amostras apresentaram uma diminuição da tensão superficial como função da temperatura.

Na Figura 18 são apresentados resultados da tensão superficial (N/m) em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$), para polpas puras e diluídas, respectivamente das marcas 1 (Fig.18a), 2 (Fig.18b), 3 (Fig.18c) e 4 (Fig.18d). Vê-se que para todas as marcas a diluição provocou um aumento da tensão superficial com relação à polpa pura, isto era uma tendência esperada, pois a água apresenta uma tensão superficial superior a da polpa pura de açaí. A comparação entre os valores da tensão superficial para polpas puras e diluídas (Fig.18) indica uma variação significativa, maior que 10% e de até 30% no caso da marca 1.

Figura 18: Gráfico da Tensão Superficial (N/m) em função da temperatura (Celcius).

Comparação entre marcas para polpa pura e diluida: (a) 1; (b) 2; (c) 3 e (d) 4.

A propriedade física, tensão superficial (γ), tem particular importância no processamento de polpas e sucos com membranas. Tais variações podem provocar mudanças significativas no desempenho do processo e em suas taxas de permeação. Tal propriedade é fundamental no cálculo do adimensional de Weber ($We = \frac{\rho d \bar{u}^2}{\gamma}$), com possibilidade de correlação com outros adimensionais num processo de transferência de massa e fluidodinâmico.

4.3. ESPECTROSCOPIA DE ATENUAÇÃO ACÚSTICA

Na Figura 19 são apresentados os gráficos da Atenuação (dB/cm) em função da frequência (Mhz) para a polpa pura (Fig.19a) e polpa diluída (Fig.19b) de diferentes marcas como especificadas na legenda de cada figura.

Figura 19: Gráfico da Atenuação (dB/cm) em função da Frequência (Mhz): (a) Polpas Puras; (b) Polpas diluídas.

Observa-se uma diferença de atenuação entre as diferentes marcas tanto para a polpa pura (Fig. 19.a) quanto para a polpa diluída (Fig. 19.b).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 20 são apresentados resultados da atenuação (dB/cm) em função da frequência (Mhz), para polpas puras e diluídas, respectivamente das marcas 1(Fig.20a), 2 (Fig.20b) e 3 (Fig.20c) e 4 (Fig.20d).

Figura 20: Gráfico da Atenuação (dB/cm) em função da Frequência (Mhz). Comparação entre polpa pura e diluída das marcas: (a) 1; (b) 2; (c) 3 e (d) 4.

Em todas as marcas, a polpa diluída apresentou uma menor atenuação com relação à polpa pura. Comportamento este esperado, pois a diluição diminui a quantidade de partículas por volume nas amostras, com uma quantidade menor de partículas haverá uma menor atenuação.

Na Figura 21 são apresentadas curvas “vi normalizado” (curva diferencial) da distribuição das partículas de amostra de polpas puras (Fig.21a) e polpas diluídas (Fig.21b) de diferentes marcas como especificadas respectivamente indicado na legenda de cada figura.

Figura 21: Distribuição do tamanho das partículas presentes em polpa de açaí: (a) Puras; (b) Diluídas.

Observa-se que para todas as marcas, tanto para a polpa pura quanto para a polpa diluída, que a maioria das partículas tem tamanho inferior a 0,6 μm de diâmetro. De acordo com Tonon et al (2009) o tamanho da partícula de açaí pode chegar a 1 mm de diâmetro. Os valores obtidos para a polpa de açaí estão dentro do observado para outros sucos de frutas. O suco de maçã é composto de uma suspensão de partículas com forma irregular onde o tamanho de suas partículas pode variar de 0,25 a 5 mm (GENOVESE & LOZANO, 2000), no suco de romã foi observado que a faixa predominantemente de tamanho das partículas variou de 0,3 a 24,6 mm (MIRSAEEDGHAZI et al. 2010) e no suco de laranja foi encontrada uma distribuição polidispersa de partículas, com diâmetros inferiores a 2 μm (CORREDIG et al., 2001).

Na Figura 22 são apresentadas curvas “vi normalizado” (curva diferencial) da distribuição das partículas para polpas puras e diluídas, respectivamente das marcas 1 (Fig.22a), 2 (Fig.22b) e 3 (Fig.22c) e 4 (Fig.22d).

Figura 22: Distribuição do tamanho das partículas presentes em polpa de açaí. Comparação entre polpa pura e diluída das marcas: (a) 1; (b) 2; (c) 3 e (d) 4.

Para todas as marcas houve uma variação do tamanho de partículas entre a polpa diluída e a polpa pura. Foi observado que a polpa pura apresentou partículas com diâmetros maiores do que a polpa diluída. Em todos os casos a polpa pura apresentou uma quantidade maior de partículas, tal comportamento pode ser relacionado com a atenuação, pois a polpa pura também apresentou uma atenuação maior em todos os casos. Como descrito anteriormente, este comportamento é esperado, pois a polpa pura apresenta uma quantidade maior de partículas em um determinado volume se comparado com a polpa diluída.

Figura 23: Gráfico da Atenuação (dB/cm) em função da Frequência (Mhz) da polpa de açaí após tratamento enzimático utilizando as enzimas comerciais Biopectinase KK Plus, Pectinex Ultra SP-L e Ultrazym AFPL na concentração de 500 mg/kg polpa de açaí no tempo de incubação de 30 minutos a 35°C.

De acordo com a figura 23 a polpa diluída sem tratamento enzimático apresentou atenuação ligeiramente menor do que as polpas tratadas enzimaticamente. As polpas tratadas enzimaticamente não apresentaram diferença na atenuação entre elas.

As curvas normalizadas da distribuição do tamanho das partículas presentes em polpa de açaí após tratamento enzimático utilizando as enzimas comerciais Pectinex Ultra SP-L, Biopectinase KK Plus e Ultrazym AFPL na concentração de 500 mg/kg polpa são mostradas na figura 24. Observa-se nessa figura que ocorreu deslocamento do tamanho das partículas das amostras de polpas tratadas enzimaticamente em relação à polpa sem tratamento. Comparando a distribuição do tamanho de partículas com o gráfico de atenuação vemos que a amostra que apresentou o menor tamanho de partículas também apresentou a menor atenuação, neste caso a polpa diluída sem tratamento enzimático. Enquanto que as polpas

tratadas enzimaticamente apresentaram para a atenuação e distribuição de partículas resultados muito próximos.

Figura 24: Distribuição do tamanho das partículas presentes em polpa de açaí após tratamento enzimático utilizando as enzimas comerciais Biopectinase KK Plus, Pectinex Ultra SP-L e Ultrazym AFPL na concentração de 500 mg/kg polpa de açaí no tempo de incubação de 30 minutos a 35°C.

As polpas de frutas são ricas em partículas sólidas de natureza fibrosa constituídas principalmente de substâncias pécicas. As moléculas de pectinas são carregadas negativamente e formam um complexo (pectina-proteína) com um núcleo protéico com carga positiva. Devido à carga negativa na superfície externa, ocorre repulsão das moléculas de pectinas. As enzimas pectinolíticas degradam as pectinas e expõem parte das proteínas carregadas positivamente, reduzindo a repulsão eletrostática entre os complexos e ocasionando a agregação dessas partículas, aumentando dessa forma o tamanho das partículas de sólidos suspensos. A polpa/suco resultante tem uma quantidade muito menor de pectinas e

também uma viscosidade mais baixa que é vantajosa para processos de separação por membranas (ALVAREZ et al., 1998; KASHYAP et al., 2001; PILNIK & VORAGEN, 1993).

O aumento do tamanho das partículas de sólidos suspensos de frutas como acerola e maçã também foi observado em alguns trabalhos (BARROS, 2002; YU & LENCKI, 2004). Barros (2002) observou que o diâmetro médio das partículas de suco de acerola integral de determinado lote passou de 0,74 μm para 0,94 μm após o tratamento enzimático. Yu & Lencki (2004) verificaram que a adição de enzimas pécnicas ao suco de maçã não clarificado levou à agregação coloidal e a uma redução em sua viscosidade.

4.4. COMPORTAMENTO REOLÓGICO

- Determinação da distância (GAP) entre as placas

O açaí apresenta uma composição química particular, rica em proteínas, fibras e lipídios (ROGEZ, 2000). Esta alta quantidade de lipídios associada com o grande número de partículas insolúveis pode ocasionar um deslizamento entre a amostra e a superfície do reômetro. Este aparente deslizamento é um fenômeno observado durante as medidas reológicas de sistemas que contém partículas como por exemplo espumas, emulsões, géis ou suspensões (BERTOLA et al, 2003).

Neste caso ocorre uma descontinuidade na taxa de deformação próxima à parede do reômetro. Próximo à parede tem uma fina camada de fluido onde o valor da tensão de cisalhamento é menor do que no resto do material, ou seja, as partículas presentes nesta fina camada não interagem com a parede ou interagem fracamente. Em altas taxas de cisalhamento, a velocidade do fluido próximo à parede é maior do que no resto do material apresentando uma viscosidade aparente menor (BARNES, 1995; BERTOLA et al., 2003; WALLS, 2003).

Para evitar este fenômeno, foi feito um estudo para determinar qual a distância ideal entre o cone e a placa para o reômetro de cone-placa. Na Figura 25 é apresentada a dependência entre a tensão de cisalhamento e a distância (gap) entre as placas, para as quatro diferentes marcas de polpa pura de açaí, utilizando o reômetro de cone-placa na temperatura de 55°C. Para cada *gap* foram feitas medidas reológicas em triplicata com três estágios de taxa de cisalhamento (primeiro ciclo crescente, primeiro ciclo decrescente e segundo ciclo crescente). Para escolha do melhor *gap* foi utilizado o segundo ciclo crescente.

(a)

(b)

Figura 25: Gráfico da tensão de cisalhamento versus a taxa de deformação usando diferentes *gaps* para a temperatura de 25°C: a) Marca 1; b) Marca 2; c) Marca 3 e d) Marca 4

As distâncias de 0,650 mm para a marca 1 e marca 2 , 0,780 mm para a marca 3 e 0,715 mm para a marca 4 apresentaram os maiores valores de tensão de cisalhamento, provavelmente porque o tamanho das partículas do açaí são maiores do que a distância entre as placas. Por outro lado, as curvas obtidas com uma distância de 1,300 mm para a marca 1, 1,170 mm para a marca 2, 1,235 mm para a marca 3 e 1,170 mm para a marca 4 apresentaram valores de tensão de cisalhamento menor do que os outros valores, provavelmente devido a uma não homogênea taxa de cisalhamento através da amostra (TONON et al., 2009).

Portanto, a distância considerada ideal para os estudos do comportamento reológico do açaí foi 0,910 mm para a todas marca de açaí. Poderiam tem sido escolhidos outros valores, mas foi escolhido um único valor para todas as marcas para que seja possível a comparação de resultados entre elas.

No trabalho de Tonon et al. (2009), o estudo do *gap* para a polpa de açaí mostrou que a melhor distância foi de 2,5 mm, valor bem superior ao utilizado neste trabalho. Tal diferença entre os valores utilizados pode ser devido à diferença entre as polpas utilizadas nos trabalhos, outro fator que pode ter contribuído para esta diferença é a utilização de reômetros distintos nos trabalhos.

- Polpa Pura

Os gráficos da tensão de cisalhamento versus a taxa de deformação obtidos com o reômetro de cone-placa e cilindros concêntricos, para as três diferentes marcas de polpa pura de açaí, nas temperaturas de 15°C, encontram-se nas Figuras 26 a 30. Os resultados apresentados são para o valor médio da triplicata.

Para ambos os sistemas de medidas, a polpa de açaí pura mostrou uma diminuição da viscosidade com o tempo de aplicação de uma determinada taxa de cisalhamento para todas as temperaturas estudadas (15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C), caracterizando o fluido como sendo não-Newtoniano. O fluido não-Newtoniano é caracterizado por não possuir uma relação linear entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$). Reciprocamente, a viscosidade aparente não é constante e é uma função da taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) (CHHABRA & RICHARDSON, 1999). Além do que todas as marcas estudadas apresentaram uma tensão inicial para o primeiro ciclo crescente de taxa de deformação, parâmetro este que é bastante importante nas aplicações industriais (JUSZCZAK et al., 2004; NINDO et al., 2007).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 26: Gráfico da tensão de cisalhamento versus a taxa de cisalhamento para a polpa pura de açaí da marca 1 na temperatura de 15°C utilizando a geometria: a) cone-placa; b) cilindros concêntricos.

Figura 27: Gráfico da tensão de cisalhamento versus a taxa de cisalhamento para a polpa pura de açaí da marca 2 na temperatura de 15°C utilizando a geometria: a) cone-placa; b) cilindros concêntricos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 28: Gráfico da tensão de cisalhamento versus a taxa de cisalhamento para a polpa pura de açaí da marca 3 na temperatura de 15°C utilizando a geometria: a) cone-placa; b) cilindros concêntricos.

Figura 29: Gráfico da tensão de cisalhamento versus a taxa de cisalhamento para a polpa pura de açaí da marca 4 na temperatura de 15°C utilizando a geometria: a) cone-placa; b) cilindros concêntricos.

Este efeito pode ser atribuído à quebra da estrutura interna do fluido o qual é formado pelas interações físicas entre as moléculas (MOLLER et al, 2006).

Tal comportamento obtido para a polpa de açaí é típico de fluidos tixotrópicos, o qual foi observado em outros produtos tais como polpa de jabuticaba (SATO & CUNHA, 2009),

mostarda (JUSZCZAK et al., 2004), suco de tomate (TIZIANI & VODOVOTZ, 2005) e purê de banana (DITCHFIELD et al., 2004) e é comumente observado em suspensões, emulsões e espumas (TABILO-MUNIZAGA e BARBOSA-CÁNOVAS, 2005). SATO E CUNHA (2009) verificaram que o aumento do tamanho da partícula promove aumento da tixotropia, viscosidade, pseudoplasticidade e tensão inicial da polpa de jabuticaba.

No reômetro com geometria de cilindros concêntricos as variações foram maiores em relação a geometria de cone-placa, este fato pode ter ocorrido devido a deposição das partículas na geometria de cilindros concêntricos.

Observa-se nos reogramas obtidos, que para certa taxa de deformação foram obtidos valores distintos de tensão de cisalhamento nos dois sistemas de medidas utilizados. De acordo com as observações feitas por VIDAL (1997), QUEIROZ (1998), PELEGRINE (1999) e BEZERRA (2000), este fato evidencia o comportamento não-Newtoniano, pois o fato de a resposta da amostra a uma taxa de deformação não ser a mesma para os diferentes sistemas de medidas, evidencia os desvios do comportamento Newtoniano. Isso porque os valores de taxa de deformação apresentados nos reogramas são definidos para fluidos Newtonianos, sendo necessária a sua correção para fluidos de características não-Newtonianos (PELEGRINE, 1999). Apesar de a proposta apresentada por BRODKEY (1971) ser relativamente simples para a geometria de cilindros concêntricos, essa correção não é trivial para outras geometrias e também para fluidos que não são descritos pela Lei da Potência (PELEGRINE, 1999).

GEHRKE (1996), mediu a viscosidade dos sucos concentrados de caju, laranja, limão e maracujá, com o objetivo de comparar os resultados obtidos nas geometrias de placas paralelas e cilindros concêntricos, e observou uma diferença no valor da viscosidade aparente nesses reogramas.

- Polpa Diluída

Na Figura 30 podem ser vistos os gráficos da tensão de cisalhamento versus a taxa de deformação obtidos com a geometria de cone-placa, para as quatro marcas de polpa diluída de açaí, na temperatura de 15°C. Os resultados apresentados são a média da triplicata.

O comportamento reológico da polpa diluída não foi avaliado pelo reômetro de geometria de cilindros concêntricos porque apresentou viscosidade aparente menor do que o mínimo necessário para este tipo de geometria.

Figura 30: Gráfico da tensão de cisalhamento versus a taxa de cisalhamento para a polpa diluída de açaí na temperatura de 15°C utilizando a geometria cone-placa para: a) Marca 1; b) Marca 2, c) Marca 3 e d) Marca 4.

A polpa de açaí diluída apresentou o mesmo comportamento apresentado pela polpa pura, ou seja, comportamento não-Newtoniano para todas as temperaturas estudadas (15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C).

Dos resultados das análises das polpas puras e diluídas, pode-se concluir que os sólidos suspensos exercem grande influência no comportamento reológico, ou seja, o comportamento não-Newtoniano da polpa pura é intensificado, em grande parte pela presença dos sólidos suspensos.

É importante ressaltar a dificuldade para obter resultados confiáveis para as temperaturas mais elevadas nas condições experimentais empregadas, esse fato é devido à evaporação da água presente nas amostras utilizadas. GEHRKE (1996) mediu o comportamento reológico de sucos concentrados comerciais de caju, laranja, limão e maracujá, com o objetivo de comparar os resultados obtidos em três sistemas de medida: placas paralelas, cilindros concêntricos tipo Searle e anular fixo com copo invertido ("double gap") no intervalo de temperatura de 50 a 80 °C. Nos experimentos a 70 e 80°C houve perdas de água por evaporação que chegaram a ocasionar variações de até 7% na concentração medida em °Brix. Este efeito pode induzir a uma falsa tixotropia e necessita monitoramento apurado, sendo mais difícil de medir e controlar no sistema de placas paralelas. Tal evaporação pode ocasionar um aumento da viscosidade da amostra, além do que a diminuição da quantidade da amostra pode tornar os resultados não confiáveis.

4.5. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS REOLÓGICOS

As Tabelas 2 a 5 apresentam os valores dos parâmetros reológicos para a polpa pura pelo ajuste dos modelos reológicos da Lei da Potência e de Herschel-Bulkley, respectivamente para o reômetro de cone-placa.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 2: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí pura da marca 1, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cone-placa.

Lei da Potência				
T (°C)	K (Pa.s)		<i>n</i>	R ²
15	0,102 ± 0,005		0,32 ± 0,01	0,9933
25	0,077 ± 0,007		0,34 ± 0,02	0,9767
35	0,0133 ± 0,0005		0,419 ± 0,007	0,9982
45	0,0123 ± 0,0004		0,401 ± 0,08	0,9977
60	0,0146 ± 0,0003		0,398 ± 0,005	0,9989
Modelo de Herschel-Bulkley				
T (°C)	τ ₀	K _H (Pa.s)	<i>n</i>	R ²
15	0,01 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,30 ± 0,02	0,9929
25	0,03 ± 0,03	0,09 ± 0,03	0,31 ± 0,01	0,9780
35	0,02 ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,23 ± 0,04	0,9758
45	0,04 ± 0,01	0,05 ± 0,01	0,21 ± 0,03	0,9778
60	0,03 ± 0,01	0,043 ± 0,009	0,23 ± 0,03	0,9836

τ₀ - tensão inicial; K - índice de consistência; K_H - índice de consistência de Herschel-Bulkley; *n* - índice de comportamento; R² – coeficiente de determinação ou correlação.

Tabela 3: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí pura da marca 2, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cone-placa.

Lei da Potência				
T (°C)	K (Pa.s)	<i>n</i>	R ²	
15	0,133 ± 0,003	0,287 ± 0,008	0,9979	
25	0,114 ± 0,003	0,316 ± 0,006	0,9975	
35	0,129 ± 0,007	0,29 ± 0,01	0,9886	
45	0,123 ± 0,009	0,32 ± 0,02	0,9854	
60	0,076 ± 0,005	0,37 ± 0,01	0,9906	
Modelo de Herschel-Bulkley				
T (°C)	τ ₀	K _H (Pa.s)	<i>n</i>	R ²
15	0,040 ± 0,009	0,104 ± 0,007	0,32 ± 0,01	0,9987
25	0,03 ± 0,01	0,094 ± 0,008	0,34 ± 0,01	0,9979
35	0,01 ± 0,03	0,13 ± 0,03	0,29 ± 0,03	0,9886
45	0,01 ± 0,04	0,12 ± 0,03	0,33 ± 0,04	0,9847
60	0,01 ± 0,02	0,08 ± 0,02	0,36 ± 0,03	0,9906

τ₀ - tensão inicial; K - índice de consistência; K_H - índice de consistência de Herschel-Bulkley; *n* - índice de comportamento; R² – coeficiente de determinação ou correlação.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 4: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí pura da marca 3, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cone-placa.

Lei da Potência				
T (°C)	K (Pa.s)		<i>n</i>	R ²
15	0,25 ± 0,01		0,30 ± 0,01	0,991
25	0,23 ± 0,01		0,303 ± 0,009	0,9936
35	0,18 ± 0,01		0,31 ± 0,01	0,9856
45	0,037 ± 0,005		0,48 ± 0,03	0,9763
60	0,029 ± 0,007		0,45 ± 0,03	0,9603
Modelo de Herschel-Bulkley				
T (°C)	τ ₀	K _H (Pa.s)	<i>n</i>	R ²
15	0,05 ± 0,05	0,22 ± 0,04	0,32 ± 0,03	0,9913
25	0,09 ± 0,03	0,17 ± 0,02	0,35 ± 0,02	0,9944
35	0,07 ± 0,05	0,14 ± 0,03	0,35 ± 0,03	0,9868
45	0,00 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,39 ± 0,03	0,9899
60	0,00 ± 0,04	0,08 ± 0,03	0,31 ± 0,05	0,9621

τ₀ - tensão inicial; K - índice de consistência; K_H - índice de consistência de Herschel-Bulkley; n - índice de comportamento; R² – coeficiente de determinação ou correlação.

Tabela 5: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí pura da marca 4, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cone-placa.

Lei da Potência				
T (°C)	K (Pa.s)		<i>n</i>	R ²
15	0,088 ± 0,003		0,291 ± 0,008	0,995
25	0,123 ± 0,009		0,31 ± 0,02	0,9811
35	0,104 ± 0,008		0,36 ± 0,02	0,9882
45	0,036 ± 0,004		0,41 ± 0,02	0,9822
60	0,062 ± 0,005		0,33 ± 0,02	0,9833
Modelo de Herschel-Bulkley				
T (°C)	τ ₀	K _H (Pa.s)	<i>n</i>	R ²
15	0,02 ± 0,01	0,076 ± 0,009	0,31 ± 0,02	0,9953
25	0,02 ± 0,04	0,14 ± 0,03	0,30 ± 0,04	0,9813
35	0,020 ± 0,003	0,12 ± 0,02	0,34 ± 0,03	0,9884
45	0,02 ± 0,02	0,05 ± 0,01	0,37 ± 0,04	0,983
60	0,02 ± 0,02	0,04 ± 0,01	0,37 ± 0,04	0,9844

τ₀ - tensão inicial; K - índice de consistência; K_H - índice de consistência de Herschel-Bulkley; n - índice de comportamento; R² – coeficiente de determinação ou correlação.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com os valores obtidos, para ambos os modelos, do índice de comportamento, a polpa de açaí pura, para as quatro marcas estudadas, apresentou para todas as temperaturas medidas o comportamento de fluido pseudoplástico, ou seja, o índice de comportamento foi menor do que 1.

As Tabelas 6 a 9 apresentam os valores dos parâmetros reológicos, para a polpa pura, pelo ajuste dos modelos reológicos da Lei da Potência e de Herschel-Bulkley, respectivamente para o reômetro de cilindros concêntricos.

Tabela 6: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí pura da marca 1, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cilindros concêntricos.

Lei da Potência				
T (°C)	K (Pa.s)	<i>n</i>	R ²	
15	0,36 ± 0,04	0,36 ± 0,02	0,9688	
25	0,38 ± 0,04	0,35 ± 0,02	0,9688	
35	0,48 ± 0,04	0,35 ± 0,02	0,9764	
45	0,42 ± 0,04	0,32 ± 0,02	0,9714	
60	0,46 ± 0,04	0,27 ± 0,02	0,9697	
Modelo de Herschel-Bulkley				
T (°C)	τ ₀	K _H (Pa.s)	<i>n</i>	R ²
15	0,4 ± 0,1	0,15 ± 0,06	0,47 ± 0,07	0,9715
25	0,5 ± 0,2	0,15 ± 0,07	0,48 ± 0,08	0,9661
35	0,51 ± 0,07	0,18 ± 0,03	0,48 ± 0,03	0,9942
45	0,42 ± 0,08	0,17 ± 0,04	0,46 ± 0,04	0,9909
60	0,4 ± 0,2	0,19 ± 0,09	0,44 ± 0,08	0,9377

τ₀ - tensão inicial; K - índice de consistência; K_H - índice de consistência de Herschel-Bulkley; *n* - índice de comportamento; R² - coeficiente de determinação ou correlação.

O coeficiente de determinação para ambos os modelos foi maior do que 93% indicando que os modelos apresentaram adequado ajuste para a polpa de açaí. Entretanto, de acordo com os reogramas obtidos, pode-se observar que a curva analisada (segundo ciclo crescente de taxa de cisalhamento) da polpa de açaí, não possui uma tensão inicial, devido a este fato, pode-se concluir que a Lei da Potência é o modelo mais indicado para descrever esta curva, pois a Lei da Potência não leva em conta tal parâmetro.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 7: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí pura da marca 2, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cilindros concêntricos.

Lei da Potência				
T (°C)	K (Pa.s)	n	R ²	
15	0,133 ± 0,003	0,287 ± 0,008	0,9979	
25	0,114 ± 0,003	0,316 ± 0,006	0,9975	
35	0,129 ± 0,007	0,29 ± 0,01	0,9886	
45	0,123 ± 0,009	0,32 ± 0,02	0,9854	
60	0,076 ± 0,005	0,37 ± 0,01	0,9906	
Modelo de Herschel-Bulkley				
T (°C)	τ_0	K _H (Pa.s)	n	R ²
15	0,040 ± 0,009	0,104 ± 0,007	0,32 ± 0,01	0,9987
25	0,03 ± 0,01	0,094 ± 0,008	0,34 ± 0,01	0,9979
35	0,01 ± 0,03	0,13 ± 0,03	0,29 ± 0,03	0,9886
45	0,01 ± 0,04	0,12 ± 0,03	0,33 ± 0,04	0,9847
60	0,01 ± 0,02	0,08 ± 0,02	0,36 ± 0,03	0,9906

τ_0 - tensão inicial; K - índice de consistência; K_H - índice de consistência de Herschel-Bulkley; n - índice de comportamento; R^2 - coeficiente de determinação ou correlação.

Tabela 8: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí pura da marca 3, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cilindros concêntricos.

Lei da Potência				
T (°C)	K (Pa.s)	n	R ²	
15	0,42 ± 0,04	0,39 ± 0,03	0,9702	
25	0,19 ± 0,02	0,57 ± 0,02	0,9888	
35	0,18 ± 0,02	0,45 ± 0,02	0,9889	
45	0,15 ± 0,01	0,46 ± 0,02	0,9864	
60	0,75 ± 0,05	0,31 ± 0,01	0,987	
Modelo de Herschel-Bulkley				
T (°C)	τ_0	K _H (Pa.s)	n	R ²
15	0,4 ± 0,2	0,15 ± 0,08	0,6 ± 0,1	0,9615
25	0,4 ± 0,2	0,10 ± 0,06	0,7 ± 0,1	0,9632
35	0,1 ± 0,1	0,16 ± 0,06	0,47 ± 0,06	0,9771
45	0,05 ± 0,09	0,15 ± 0,05	0,44 ± 0,06	0,979
60	0,7 ± 0,1	0,31 ± 0,05	0,44 ± 0,03	0,9943

τ_0 - tensão inicial; K - índice de consistência; K_H - índice de consistência de Herschel-Bulkley; n - índice de comportamento; R^2 - coeficiente de determinação ou correlação.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 9: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí pura da marca 4, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cilindros concêntricos.

Lei da Potência				
T (°C)	K (Pa.s)		<i>n</i>	R ²
15	0,057 ± 0,005		0,57 ± 0,02	0,9905
25	0,067 ± 0,006		0,55 ± 0,02	0,9909
35	0,041 ± 0,005		0,57 ± 0,03	0,9852
45	0,061 ± 0,006		0,53 ± 0,02	0,9896
60	0,15 ± 0,01		0,44 ± 0,01	0,9925
Modelo de Herschel-Bulkley				
T (°C)	τ ₀	K _H (Pa.s)	<i>n</i>	R ²
15	0,13 ± 0,02	0,023 ± 0,006	0,72 ± 0,05	0,9937
25	0,16 ± 0,02	0,023 ± 0,005	0,73 ± 0,04	0,9958
35	0,11 ± 0,03	0,013 ± 0,005	0,76 ± 0,06	0,9896
45	0,14 ± 0,02	0,020 ± 0,003	0,72 ± 0,04	0,9947
60	0.20 ± 0.03	0.07 ± 0.02	0.57 ± 0.03	0.9964

τ_0 - tensão inicial; K - índice de consistência; K_H - índice de consistência de Herschel-Bulkley; n - índice de comportamento; R^2 - coeficiente de determinação ou correlação.

As Tabelas 10 a 13 apresentam os valores dos parâmetros reológicos, para a polpa diluída, pelo ajuste dos modelos reológicos da Lei da Potência e de Herschel-Bulkley, respectivamente para o reômetro de cilindros de cone-placa.

Dentre os modelos da Lei da Potência e de Herschel-Bulkley usados para descrever o comportamento reológico da polpa de açaí diluída, o modelo que melhor se ajustou foi a Lei da Potência, apresentando um coeficiente de determinação maior do que 94% para as marcas 1 e 3. Para a marca 2 nas temperaturas de 15°C e 60°C foi obtido um valor inferior a 90%, nas demais temperaturas o valor foi superior a 98%.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 10: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí diluída da marca 1, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cone-placa.

Lei da Potência				
T (°C)	K (Pa.s)	<i>n</i>		R ²
15	0,057 ± 0,005	0,14 ± 0,02		0,8979
25	0,0079 ± 0,0008	0,38 ± 0,02		0,9877
35	0,0031 ± 0,0003	0,47 ± 0,02		0,9915
45	0,0034 ± 0,0003	0,46 ± 0,02		0,9894
60	0,006 ± 0,001	0,25 ± 0,05		0,8806
Modelo de Herschel-Bulkley				
T (°C)	τ ₀	K _H (Pa.s)	<i>n</i>	R ²
15	0,0 ± 0,2	0,2 ± 0,2	0,06 ± 0,05	0,9296
25	0,00 ± 0,03	0,05 ± 0,03	0,13 ± 0,06	0,9400
35	0,07 ± 0,08	0,06 ± 0,08	0,0 ± 0,1	0,7928
45	0,03 ± 0,02	0,02 ± 0,03	0,0 ± 0,3	0,6749
60	0,05 ± 0,05	0,04 ± 0,06	0,0 ± 0,2	0,7377

τ₀ - tensão inicial; K - índice de consistência; K_H - índice de consistência de Herschel-Bulkley; n - índice de comportamento; R² – coeficiente de determinação ou correlação.

Tabela 11: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí diluída da marca 2, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cone-placa.

Lei da Potência				
T (°C)	K (Pa.s)	<i>n</i>	R ²	
15	0,0102 ± 0,0008	0,39 ± 0,02	0,9887	
25	0,010 ± 0,001	0,33 ± 0,03	0,9717	
35	0,0053±0,0005	0,42 ± 0,02	0,9869	
45	0,0097 ± 0,0006	0,29 ± 0,01	0,9881	
60	0,0025 ± 0,0004	0,53 ± 0,03	0,9771	
Modelo de Herschel-Bulkley				
T (°C)	τ ₀	K _H (Pa.s)	<i>n</i>	R ²
15	0,00 ± 0,02	0,04 ± 0,02	0,17 ± 0,05	0,9508
25	0,00 ± 0,03	0,05 ± 0,03	0,14 ± 0,06	0,9311
35	0,00 ± 0,03	0,04 ± 0,03	0,11 ± 0,07	0,9155
45	0,000 ± 0,005	0,017 ± 0,005	0,21 ± 0,04	0,9747
60	0,00 ± 0,04	0,04 ± 0,04	0,10 ± 0,09	0,8725

τ₀ - tensão inicial; K - índice de consistência; K_H - índice de consistência de Herschel-Bulkley; n - índice de comportamento; R² – coeficiente de determinação ou correlação.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 12: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí diluída da marca 3, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cone-placa.

Lei da Potência				
T (°C)	K (Pa.s)	n	R ²	
15	0,0026 ± 0,0006	0,51 ± 0,05	0,9679	
25	0,008 ± 0,001	0,36 ± 0,03	0,9701	
35	0,0009 ± 0,0004	0,59 ± 0,08	0,9442	
45	0,0032 ± 0,0007	0,42 ± 0,05	0,9489	
60	0,0029 ± 0,0003	0,39 ± 0,02	0,9784	
Modelo de Herschel-Bulkley				
T (°C)	τ_0	K _H (Pa.s)	n	R ²
15	0,00 ± 0,02	0,00 ± 0,02	0,17 ± 0,07	0,9019
25	0,00 ± 0,03	0,04 ± 0,03	0,14 ± 0,07	0,9087
35	0,2 ± 0,9	0,0 ± 0,9	0,1 ± 0,2	0,6989
45	0,000 ± 0,009	0,015 ± 0,008	0,21 ± 0,07	0,9271
60	0,04 ± 0,02	0,00 ± 0,03	0,1 ± 0,1	0,8106

τ_0 - tensão inicial; K - índice de consistência; K_H - índice de consistência de Herschel-Bulkley; n - índice de comportamento; R^2 - coeficiente de determinação ou correlação.

Tabela 13: Parâmetros Reológicos da Lei da Potência e do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de açaí diluída da marca 4, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C, utilizando o reômetro de cone-placa.

Lei da Potência				
T (°C)	K (Pa.s)	n	R ²	
15	0,025 ± 0,001	0,26 ± 0,01	0,9895	
25	0,0075 ± 0,0005	0,34 ± 0,01	0,9908	
35	0,0045 ± 0,0005	0,38 ± 0,02	0,9798	
45	0,0036 ± 0,0005	0,37 ± 0,03	0,9639	
60	0,032 ± 0,0006	0,33 ± 0,04	0,9119	
Modelo de Herschel-Bulkley				
T (°C)	τ_0	K _H (Pa.s)	n	R ²
15	0,000 ± 0,006	0,029 ± 0,005	0,24 ± 0,02	0,9898
25	0,000 ± 0,002	0,009 ± 0,001	0,30 ± 0,02	0,9915
35	0,2 ± 0,6	0,0 ± 0,6	0,00 ± 0,08	0,8679
45	0,2 ± 0,5	0,0 ± 0,5	0,00 ± 0,09	0,8577
60	0,001 ± 0,002	0,003 ± 0,002	0,34 ± 0,09	0,9122

τ_0 - tensão inicial; K - índice de consistência; K_H - índice de consistência de Herschel-Bulkley; n - índice de comportamento; R^2 - coeficiente de determinação ou correlação.

Foi observado um valor inferior do índice de consistência (K) para a Lei da Potência e do índice de consistência de Herschel-Bulkley (K_H) com a relação a polpa pura. Fato este que evidencia, conforme foi dito anteriormente, que os sólidos suspensos exercem grande influência no comportamento reológico (SARAVACOS, 1970; SATO & CUNHA, 2009).

O comportamento reológico do suco de cenoura foi estudado utilizando um viscosímetro rotacional nas temperaturas entre 8 e 85°C apresentando um comportamento pseudoplástico, no qual o modelo de Herschel-Bulkley apresentou um ótimo ajuste (VANDRESEN et al., 2009). PEREIRA et al. (2008) estudou o comportamento reológico da polpa de umbu, no qual o índice de comportamento (n) apresentou valores menores do que 1, indicando o comportamento pseudoplástico. O modelo de Herschel-Bulkley apresentou um bom ajuste para a amostra, obtendo valores para o coeficiente de determinação (R^2) maiores do que 98%. Suco industrializado de acerola foi estudado em diferentes concentrações de sólidos solúveis (4, 7, 10, 13 e 16°Brix) e temperaturas (5 a 85°C), usando um reômetro de cilindros concêntricos. Os autores observaram que os melhores resultados foram obtidos utilizando o modelo de Herschel-Bulkley, obtendo baixos valores para o índice de comportamento (0,338-0,759) confirmando o comportamento pseudoplástico do suco de acerola (SILVA et al., 2005).

4.6. ANÁLISE DE HISTERESE

- Polpa Pura

A análise da histerese é feita pelo cálculo das áreas sob as curvas dos reogramas obtidos para avaliar o grau de tixotropia das amostras de açaí estudadas. Os valores obtidos para a

RESULTADOS E DISCUSSÕES

polpa de açaí pura de diferentes marcas para as geometrias de cone-placa e cilindros concêntricos são mostrados nas tabelas 14 a 17.

Tabela 14: Cálculo das áreas sob as curvas dos reogramas obtidos, para a polpa de açaí pura da marca 1, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C.

Cone-Placa (Pa.s⁻¹)					
T (°C)	1º Ciclo Crescente	1º Ciclo Decrescente	2º Ciclo Crescente	D1	D2
15	114,63	99,41	88,64	15,22	10,77
25	112,18	95,67	86,63	16,51	9,04
35	112,42	97,02	88,10	15,39	8,92
45	118,66	101,98	93,38	16,67	8,61
60	101,09	77,21	73,71	23,88	3,49

Cilindros Concêntricos (Pa.s⁻¹)					
T (°C)	1º Ciclo Crescente	1º Ciclo Decrescente	2º Ciclo Crescente	D1	D2
15	411,93	330,45	345,55	81,51	15,12
25	439,06	348,57	367,43	90,49	18,86
35	539,24	407,71	410,96	131,54	3,26
45	427,57	339,98	348,54	87,59	8,56
60	367,31	306,82	327,68	60,49	20,86

D1 – Módulo da diferença entre a área do 1º ciclo crescente e a área do 1º ciclo decrescente

D2 – Módulo da diferença entre a área do 1º ciclo decrescente e a área do 2º ciclo crescente

Tabela 15: Cálculo das áreas sob as curvas dos reogramas obtidos, para a polpa de açaí pura da marca 2, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C.

Cone-Placa (Pa.s⁻¹)					
T (°C)	1º Ciclo Crescente	1º Ciclo Decrescente	2º Ciclo Crescente	D1	D2
15	114,63	99,41	88,64	15,22	10,77
25	112,18	95,67	86,63	16,51	9,04
35	112,42	97,02	88,10	15,39	8,92
45	118,69	101,99	93,38	16,67	8,61
60	101,09	77,21	73,71	23,88	3,49

Cilindros Concêntricos (Pa.s⁻¹)					
T (°C)	1º Ciclo Crescente	1º Ciclo Decrescente	2º Ciclo Crescente	D1	D2
15	59,59	44,45	45,75	15,15	1,30
25	36,96	25,84	29,09	11,13	3,25
35	54,06	40,21	40,11	13,85	0,09
45	52,59	40,61	43,23	11,99	2,62
60	55,72	43,33	51,64	12,38	8,30

D1 – Módulo da diferença entre a área do 1º ciclo crescente e a área do 1º ciclo decrescente

D2 – Módulo da diferença entre a área do 1º ciclo decrescente e a área do 2º ciclo crescente

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 16: Cálculo das áreas sob as curvas dos reogramas obtidos, para a polpa de açaí pura da marca 3, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C.

Cone-Placa (Pa.s⁻¹)					
T (°C)	1º Ciclo Crescente	1º Ciclo Decrescente	2º Ciclo Crescente	D1	D2
15	278,43	205,13	183,38	73,29	21,75
25	245,29	183,21	166,27	62,08	16,94
35	218,43	150,69	134,39	67,74	16,30
45	165,75	72,05	63,33	93,69	8,72
60	136,82	50,61	44,78	86,21	5,83
Cilindros Concêntricos (Pa.s⁻¹)					
T (°C)	1º Ciclo Crescente	1º Ciclo Decrescente	2º Ciclo Crescente	D1	D2
15	202,57	139,98	124,91	62,59	15,06
25	664,47	501,69	495,48	162,78	6,21
35	294,17	234,12	273,85	60,05	39,79
45	240,09	196,75	229,39	43,34	32,64
60	520,96	530,52	588,96	9,56	58,45

D1 – Módulo da diferença entre a área do 1º ciclo crescente e a área do 1º ciclo decrescente

D2 – Módulo da diferença entre a área do 1º ciclo decrescente e a área do 2º ciclo crescente

Tabela 17: Cálculo das áreas sob as curvas dos reogramas obtidos, para a polpa de açaí pura da marca 4, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C.

Cone-Placa (Pa.s⁻¹)					
T (°C)	1º Ciclo Crescente	1º Ciclo Decrescente	2º Ciclo Crescente	D1	D2
15	91,55	69,52	59,99	22,04	9,53
25	137,82	105,61	91,99	32,21	13,61
35	138,26	107,70	96,48	30,56	11,22
45	47,76	47,42	41,52	0,34	5,89
60	66,01	51,55	49,53	14,46	2,014
Cilindros Concêntricos (Pa.s⁻¹)					
T (°C)	1º Ciclo Crescente	1º Ciclo Decrescente	2º Ciclo Crescente	D1	D2
15	196,35	149,03	148,83	47,32	0,21
25	203,31	148,91	159,99	54,39	11,07
35	132,88	103,79	104,88	29,09	1,09
45	170,47	125,47	135,87	45,01	10,40
60	234,53	224,07	221,52	10,45	2,55

D1 – Módulo da diferença entre a área do 1º ciclo crescente e a área do 1º ciclo decrescente

D2 – Módulo da diferença entre a área do 1º ciclo decrescente e a área do 2º ciclo crescente

A diferença entre os valores da área do 1º ciclo crescente e a área do 1º ciclo decrescente e da diferença entre a área do 1º ciclo decrescente e a área do 2º ciclo crescente, ou seja, D1 e D2 fornece o grau de tixotropia da amostra. Quanto maiores os valores de D1 e

RESULTADOS E DISCUSSÕES

D2 maior o grau de tixotropia da amostra. Dos resultados obtidos, vê-se que D2 apresenta valores bastante inferiores com relação a D1, ou seja, a partir do 2º ciclo crescente o comportamento tixotrópico da amostra passa a diminuir e em alguns casos a não existir mais.

- Polpa Diluída

Na Tabela 18 são apresentados os valores do cálculo das áreas para as polpas de açaí diluídas das diferentes marcas para a geometria de cone-placa.

Tabela 18: Cálculo das áreas sob as curvas dos reogramas obtidos, para as polpas de açaí diluídas, nas temperaturas de 15°C, 25°C, 35°C, 45°C e 60°C.

Marca 1 (Pa.s⁻¹)					
T (°C)	1º Ciclo Crescente	1º Ciclo Decrescente	2º Ciclo Crescente	D1	D2
15	26,03	21,12	19,46	4,91	1,66
25	11,02	8,89	8,55	2,13	0,34
35	5,03	4,82	4,59	0,20	0,23
45	5,38	4,65	4,85	0,73	0,19
60	4,33	3,29	3,15	1,04	0,14
Marca 2 (Pa.s⁻¹)					
T (°C)	1º Ciclo Crescente	1º Ciclo Decrescente	2º Ciclo Crescente	D1	D2
15	14,22	10,45	10,82	3,77	0,37
25	10,28	8,02	8,33	2,26	0,31
35	5,43	4,54	6,29	0,89	1,75
45	4,41	5,26	6,63	0,85	1,38
60	5,81	4,08	4,94	1,73	0,86
Marca 3 (Pa.s⁻¹)					
T (°C)	1º Ciclo Crescente	1º Ciclo Decrescente	2º Ciclo Crescente	D1	D2
15	5,95	4,97	4,73	0,98	0,24
25	7,53	6,67	6,93	0,86	0,26
35	2,77	2,48	2,48	0,29	0,00
45	2,22	3,25	3,69	1,03	0,45
60	3,14	3,03	3,13	0,11	0,10
Marca 4 (Pa.s⁻¹)					
T (°C)	1º Ciclo Crescente	1º Ciclo Decrescente	2º Ciclo Crescente	D1	D2
15	13,98	14,38	15,09	0,39	0,71
25	4,39	4,67	6,22	0,28	1,56
35	3,65	3,58	4,55	0,07	0,97
45	3,20	2,94	3,53	0,26	0,59
60	3,04	1,93	2,63	1,12	0,71

D1 – Módulo da diferença entre a área do 1º ciclo crescente e a área do 1º ciclo decrescente

D2 – Módulo da diferença entre a área do 1º ciclo decrescente e a área do 2º ciclo crescente

Comparando os valores de D1 da polpa pura e da polpa diluída, a polpa diluída apresentou uma grande redução do grau de tixotropia com relação à polpa pura, em alguns casos esse comportamento até desapareceu.

4.7. VISCOSIDADE APARENTE

Nas Figuras 31 a 34, tem-se a viscosidade aparente versus a taxa de deformação como função da temperatura para a polpa pura de açaí para as quatro marcas estudadas em ambas as geometrias, cone-placa e cilindros concêntricos.

Figura 31: Gráfico da viscosidade aparente para diferentes temperaturas da polpa de açaí pura da marca 1 utilizando a geometria: a) cone-placa; b) cilindros concêntricos.

Figura 32: Gráfico da viscosidade aparente para diferentes temperaturas da polpa de açaí pura da marca 2 utilizando a geometria: a) cone-placa; b) cilindros concêntricos.

Figura 33: Gráfico da viscosidade aparente para diferentes temperaturas da polpa de açaí pura da marca 3 utilizando a geometria: a) cone-placa; b) cilindros concêntricos.

Figura 34: Gráfico da viscosidade aparente para diferentes temperaturas da polpa de açaí pura da marca 4 utilizando a geometria: a) cone-placa; b) cilindros concêntricos.

Das curvas pode-se observar que, para todas as temperaturas estudadas a viscosidade aparente não é constante, ela diminui com o aumento da taxa de deformação, ou seja, ela é uma função da taxa de deformação. Este fato confirma a pseudoplasticidade da polpa de açaí. Este comportamento já tinha sido observado pelos valores obtidos para o índice de comportamento em ambos os modelos reológicos estudados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na figura 28, tem-se a viscosidade aparente versus a taxa de deformação como função da temperatura para a polpa de açaí diluída para todas as marcas estudadas utilizando a geometria de cone-placa.

Figura 35: Gráfico da viscosidade aparente versus a taxa de cisalhamento para diferentes temperaturas da polpa de açaí diluída utilizando a geometria de cone-placa para as marcas: a)1, b)2, c)3 e d)4.

O mesmo comportamento, que foi visto para a polpa pura, é observado para a polpa diluída, ou seja, ela apresenta comportamento pseudoplástico, mostrando uma diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de deformação.

Os experimentos mostram que, com a diluição, ocorre uma redução acentuada da viscosidade aparente, facilitando o escoamento do suco e a troca de calor durante o processo.

De acordo com BEZERRA (2000), quanto menor a viscosidade do fluido, menor é a perda de carga durante o escoamento, diminuindo assim os custos de potência com bombeamento e consequentemente os custos energéticos. No entanto, ocorre também diluição dos compostos de interesse como as antocianinas. Dessa forma, são interessantes os tratamentos da matéria-prima a ser microfiltrada que diminuam a viscosidade minimizando a adição de água. Para isso, os tratamentos com enzimas despolimerizantes são verdadeiros aliados.

Figura 36: Comportamento da viscosidade aparente das amostras de polpa de açaí submetidas a hidrólise enzimática utilizando Pectinex Ultra SP-L na concentração de 500 mg/kg polpa de açaí nos tempos de incubação especificados: 30, 60, 90 e 120 minutos a 35°C. Pura – polpa de açaí apenas descongelada.

Figura 37: Comportamento da viscosidade aparente das amostras de polpa de açaí submetidas a hidrólise enzimática utilizando Biopectinase KK Plus na concentração de 500 mg/kg polpa de açaí nos tempos de incubação especificados: 30, 60, 90 e 120 minutos a 35°C. Pura – polpa de açaí apenas descongelada.

Figura 38: Comportamento da viscosidade aparente das amostras de polpa de açaí submetidas a hidrólise enzimática utilizando Ultrazym AFPL na concentração de 500 mg/kg polpa de açaí nos tempos de incubação especificados: 30, 60, 90 e 120 minutos a 35°C. Pura – polpa de açaí apenas descongelada.

Figura 39: Comportamento da viscosidade aparente das amostras de polpa de açaí submetidas a hidrólise enzimática utilizando Ultrazym AFPL na concentração de 1000 mg/kg polpa de açaí nos tempos de incubação especificados: 30, 60, 90 e 120 minutos a 35°C. Pura – polpa de açaí apenas descongelada.

Os resultados indicam que a enzima comercial Ultrazym (Figura 38 e 39) foi mais eficiente na redução da viscosidade aparente da polpa de açaí, sendo que nos casos das enzimas Pectinex e Biopectinase (Figuras 36 e 37, respectivamente), não houve alteração significativa da viscosidade. Na Figura 39 estão ilustrados os resultados de viscosidade para os tratamentos feitos com Ultrazym a 1000 mg/kg de polpa. Testou-se essa concentração para verificar se, nesse caso, a hidrólise pudesse ser mais intensa do que a 500 mg/kg.

Na tabela 19 se pode observar a porcentagem de redução da viscosidade aparente no ponto final da taxa de deformação (193 s^{-1}) a qual foi escolhida por simular, de certa forma, a força de cisalhamento resultante do fluxo tangencial que a suspensão de açaí sofre durante o processo de microfiltração. No caso das enzimas Pectinex e Biopectanase houve aumento da viscosidade em quase todos os tempos de incubação. No caso da enzima Ultrazym ocorreu

RESULTADOS E DISCUSSÕES

diminuição da viscosidade em todos os tempos de incubação, sendo que na concentração de 500 mg/kg de polpa a maior redução foi a 90 minutos e a 1000 mg/kg foi a 60 minutos.

Para os ensaios de microfiltração com pré-tratamento enzimático optou-se por escolher os seguintes parâmetros: enzima Ultrazym na concentração de 500 mg/kg de polpa no tempo de incubação de 30 minutos. A concentração de 1000 mg/kg, por enquanto, foi desconsiderada por ser muito alta em comparação ao que se encontra na literatura. No caso da concentração de 500 mg/kg, foi escolhido o tempo de 30 minutos porque não houve diferença em comparação ao de 60 minutos. O tempo de incubação de 90 minutos, embora tenha apresentado a maior redução, foi desconsiderado porque pode ocasionar oxidação indesejável dos compostos fenólicos.

Tabela 19: Porcentagem (%) de redução da viscosidade no ponto de maior taxa de deformação (193 1/s) em comparação a viscosidade da polpa pura.

Tempo de incubação (minutos)	Pectinex Ultra SP-L	Biopectinase KK Plus	Ultrazym AFPL	
	500 mg/kg polpa	500 mg/kg polpa	500 mg/kg polpa	1000 mg/kg polpa
30	-21	-22	45	47
60	-16	-19	46	61
90	-22	-19	61	63
120	-13	7	45	63

Os resultados reológicos da polpa diluída antes do processo de microfiltração e das amostras originadas no processo (retentado e permeado) utilizando a membrana de 0,8 μm , são apresentados na figura 40.

Figura 40: Viscosidade aparente de amostras originárias da microfiltração utilizando membrana de 0,8 μm para: a)MF1 e b)MF2 sem tratamento enzimático e c)MF3 com tratamento enzimático.

Em todas as microfiltrações utilizando membrana de 0,8 μm o retentado apresentou viscosidade aparente maior do que o permeado e a polpa diluída. Nas microfiltrações 1 e 2 (MF1 e MF2), a polpa diluída apresentou viscosidade aparente maior do que o permeado, em ambas não houve tratamento enzimático. Enquanto que na microfiltração 3 (MF3) a polpa diluída apresentou uma viscosidade aparente menor do que o permeado, nesta microfiltração houve tratamento.

Figura 41: Viscosidade aparente da microfiltração utilizando membrana de 0,2 µm para: a)MF4 e b)MF5 sem tratamento enzimático e c)MF6 com tratamento enzimático.

Para as microfiltrações sem tratamento enzimático utilizando a membrana de 0,2 µm (MF4 e MF5) o retentado apresentou valores de viscosidade aparentes muito próximos da polpa diluída, mas mesmo assim ele apresentou um valor ligeiramente maior, enquanto que a polpa diluída em ambos os casos apresentou viscosidade aparente superior ao permeado. Na microfiltração com tratamento enzimático utilizando a membrana de 0,2 µm (MF6), a polpa diluída apresentou viscosidade aparente inferior ao permeado. Este comportamento foi observado para as duas membranas estudadas (0,8 µm e 0,2 µm), o qual pode ser devido ao tratamento enzimático que pode ter contribuído no processo de microfiltração diminuindo a viscosidade do permeado com relação à polpa diluída.

5. Conclusões

A partir desta investigação experimental e de acordo com os objetivos propostos, pode-se concluir:

- i) A polpa pura inicialmente apresentou uma diminuição da tensão superficial com aumento da temperatura, mas para valores de temperatura maiores que 45°C, a tensão superficial apresentou um aumento com o aumento da temperatura para as polpas das marcas 1 e 2 e em todos os casos a polpa de açaí diluída apresentou tensão superficial superior à polpa pura.;
- ii) A polpa diluída apresentou uma menor atenuação com relação à polpa pura. As polpas de açaí, pura e diluída, possuem partículas com diâmetro inferior a 0,6 μm , no qual a polpa pura apresentou partículas com diâmetros maiores;
- iii) A polpa de açaí apresentou comportamento não-Newtoniano com tensão inicial e o modelo reológico que melhor se ajustou as curvas estudadas foi a Lei da Potência para todas as temperaturas. As amostras apresentaram comportamento típico de fluidos tixotrópicos em função da temperatura, e depois de três ciclos esse comportamento foi praticamente eliminado;
- iv) Foram obtidos valores distintos no comportamento reológico do açaí para ambas as geometrias utilizadas, cone-placa e cilindros concêntricos. Entretanto, a polpa de açaí foi classificada como sendo não-Newtoniana para ambas as geometrias e modelos estudados;

- v) A polpa de açaí diluída apresentou o mesmo comportamento reológico encontrado para a polpa pura. A diluição da polpa de açaí proporcionou uma redução acentuada da viscosidade aparente, mostrando a influência dos sólidos totais no comportamento reológico;
- vi) Para as enzimas Pectinex e Biopectinase foi observado um aumento da viscosidade em quase todos os tempos de incubação. No caso da enzima Ultrazym ocorreu diminuição da viscosidade em todos os tempos de incubação, sendo que na concentração de 500 mg/kg de polpa a maior redução foi a 90 minutos e a 1000 mg/kg foi a 60 minutos;
- vii) Em todas as microfiltrações o retentado apresentou viscosidade aparente maior do que o permeado e a polpa diluída. Para as microfiltrações sem tratamento enzimático a polpa diluída apresentou viscosidade aparente superior ao permeado. Enquanto que na microfiltração com tratamento enzimático a polpa diluída apresentou viscosidade aparente inferior ao permeado.

6. Trabalhos Futuros

Como sugestões de trabalhos futuros decorrentes desta pesquisa, pode-se sugerir:

- i) Ampliar o estudo das propriedades físicas e suas variações dos produtos (permeado e retentado) gerados no processo de microfiltração tangencial por membranas cerâmicas da polpa de açaí;
- ii) Utilizar outros sistemas de medidas, assim como outras metodologias para caracterização do fluido complexo;
- iii) Investigar a influência da concentração de lipídeos e fibras insolúveis nas propriedades físicas;
- iv) Analisar as características do produto (cor, propriedades nutricionais, sensoriais, microbiológicas) da microfiltração.

7. Referências Bibliográficas

ADORNO, R.A.C. (1997). **Reologia de Sucos de Frutas Tropicais: Manga, Maracujá, Mamão, e Goiaba**. 178p. Tese (Mestrado) - Unicamp, Campinas, 1997.

ALASALVAR, C.; AL-FARSI, M.; QUANTICK, P.C.; SHAHIDI, F.; WIKTOROWICZ. (2005). Effect of chill storage and modified atmosphere packing (MAP) on antioxidant activity, anthocyanins, carotenoids, phenolics and sensory quality of ready-to-eat shredded orange and purple carrots. **Food Chemistry**, n.89, p.69-76.

ALBA, F. et al. (1999). Acoustic spectroscopy as a technique for the particle sizing of high concentration colloids, emulsions and suspensions. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v.153, p.495 – 502.

ALLEGRA, J.R.; HAWLEY, S.A. (1972). **J. Acoust. Soc. Am.** S1, p.1545-1564.

ALTMANN, J.; RIPPERGER, S. (1997). Particle deposition and layer formation at the crossflow microfiltration. **J. Membr. Sci.**, v.124, p.119–128.

ALVAREZ, S.; ALVAREZ, R.; RIERA, F.A.; COCA, J. (1998). Influence of depectinization on apple juice ultrafiltration. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v.138, p.377–382.

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

AOAC - Association of Official Analytical Chemists (1995). **Official Methods of Analysis of AOAC International – Food composition, additives, natural contaminants - 16th Edition** (Arlington, Virginia, USA: AOAC International), 1995.

BABICK, F.; RIPPERGER, S. (2002). Information Content of Acoustic Attenuation Spectra. **Part. Syst. Charact.**, v.19, p.176-185.

BAILEY et al. (2000). The effect of ultrafiltration on the subsequent concentration of grape juice by osmotic distillation. **Journal of Membrane Science**, v. 164, p.195-204.

BARBOSA-CÁNOVAS, G.V.; KOKINI, J.L.; M.A., L.; IBARZ, A. (1996). The rheology of semiliquid foods. **Advances in Food and Nutrition Research**, v.39, p.1–69.

BARBOSA-CÁNOVAS, G.V.; RODRÍGUEZ, J.J. (2002). Update on nonthermal food processing technologies, irradiation and ultrasound. **Food Australia**, Australia, v.54, n.11, nov.

BARNES, H.A. (1995). A Review of the Slip (Wall Depletion) of Polymer Solutions, emulsions and Particle Suspensions in Viscometers: Its Cause, Character, and Cure. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 56, pp. 221-251.

BARROS, S.T.D. (2002). **Clarificação dos sucos de acerola e abacaxi por ultrafiltração: modelagem e simulação do fluxo de permeado e determinação dos mecanismos de *fouling***. 239p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2002.

BENNETT, C.O.; MYERS, J.E. (1978). **Fenômenos de Transporte: Quantidade de Movimento, Calor e Massa**. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo.

BERTOLA, V. et al. (2003). Wall Slip and Yielding in Pasty Materials. **Journal of Rheology**, v. 47, n. 5, pp. 1211-1226.

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

BHATTACHARYA, S.; VASUDHA, N.; MURTHY, K.S.K. (1999). Rheology of mustard paste: a controlled stress measurement. **J. Fd. Eng.**, v.41, p.187–191.

BIRD, R.B; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. (1960). **Transport Phenomena**. John Wiley & Sons.

- BOBBIO, F.O.; DRUZIAN, J.I.; ABRÃO, P.A.; BOBBIO, P.A.; FADELLI, S. (2000). Identificação e quantificação das antocianinas do fruto do açaizeiro (*Euterpe oleracea*) Mart.. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.20, n.3, p.388-390.
- BRANCO, I.G. (1995). **Suco de Laranja Concentrado – Comportamento Reológico a Baixas Temperaturas**. 88p. Tese (Mestrado) – Unicamp, Campinas, 1995.
- BRASIL (2000). Instrução Normativa nº 01, de 07 de janeiro de 2000. Regulamento Técnico Geral para fixação dos Padrões de Identidade e Qualidade para polpa de fruta. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 10 jan. 2000.
- BRASIL (2003). Instrução Normativa nº 12, de 04 de setembro de 2003. Regulamento Técnico para fixação dos Padrões de Identidade e Qualidade gerais para suco tropical. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 04 set. 2003.
- BRODKEY, R.S. (1971). **The Phenomena of Fluid Motion**. EUA: Addison-Wesley, 472p.
- BUTZ, P.; TAUSCHER, B. (2002). Emerging technologies: chemical aspects. **Food Research International**, v.35, p.279-284.
- CATTON, N.L. (1953). The Neoprenes, **Rubber Chemical Division, E.I. Du Pont De Nemours**, Wilmington, DW.
- CHARM, S. (1960). Viscometry of Non-Newtonian food Materials. **Food Research**, Chicago, v.25, n.3, p.351-362.
- CHARM, S.E. (1971). **Fundamentals of Food Engineering**. The AVI, Publishing Co.
- CHECHETKIN, A.V. (1970). High-Temperature Heat Carriers of Liquids. **Mosk. Gos. Univ.**, Moscow [in Russian].
- CHEFTEL, J.C. (1995). Review: High-pressure, microbial inactivation and food preservation. **Food Science and Technology International**, v. 1, p. 75-90.
- CHERYAN, M. (1998). **Ultrafiltration and microfiltration handbook**. Lancaster: Technomic Publishing Company, 527 p.
- CHHABRA, R.P.; RICHARDSON, J.F. (1999). Non-Newtonian Flow: Fundamentals and Engineering Applications. **Elsevier Butterworth-Heinemann**, 436 p.

CORNELISSEN, E.R. et al. (1998). Physicochemical aspects of polymer selection for ultrafiltration and microfiltration membranes. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v.138, p.283–289.

CORREDIG, M.; KERR, W.; WICKER, L. (2001). Particle Size Distribution of Orange Juice Cloud after Addition of Sensitized Pectin. **J. Agric. Food Chem.**, v.49, p.2523-2526.

COSTELL, E.; DURÁN, L. (1982). Reología físico química de los zumos y purés de frutas. Madrid. **Revista de agroquímica y tecnología de alimentos**, v.22, n.1, p.81-94.

CRANDALL, P.G.; CHEN, C.S.; CARTER, R.D. (1982). Models for predicting viscosity of orange juice concentrate. **Food Technology**, v.5, n.36, p.245-252.

CZEKAJ, P; LOPEZ, F.; GUELL, C. (2000). Membrane fouling by turbidity constituent of beer and wine: characterization and prevention by means of infrasonic pulsing. **Journal of Food Engineering**, v.49, p.25-36.

DANN, J.R. (1970). Forces involved in the adhesive process. I. Critical surface tensions of polymeric solids as determined with polar liquids. **J. Colloid Interface Sci.**, v.32, n.2, p.302-331.

DEL COLLE, R. (2005). **Desemulsificação de emulsões estáveis de água e óleo de girassol por processo de filtração tangencial**. 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo, São Carlos, SP, 2005.

DERKSEN, J.J.; PRASHANT (2009). Simulations of complex flow of thixotropic liquids. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v.160, p. 65-75.

DICKERSON, R.W. (1965). An apparatus for measurements of thermal diffusivity of foods. **Food Technology**, v.19, n.5, p.198-204.

DITCHFIELD, C.; TADINI, C.C.; SINGH, R.; TOLEDO, R.T. (2004). Rheological properties of banana puree at high temperatures. **International Journal of Food Properties**, v.7, n.3, pp.571–584.

DUKHIN, A.S.; GOETZ, P.J. (1996). **Langmuir**, v.12, n.21, p. 4987–4997.

DUKHIN, A.S.; GOETZ, P.J.; HAMLET, C.W. (1996). **Langmuir**, v.12, n.21, p.4998–5004.

DUKHIN, A.S.; GOETZ, P. J.; TRAVERS, B. (2005). Use of ultrasound for characterizing dairy products, **J. Dairy Science**, v.88, n.7, p.1320–1334.

DUKHIN, A.S.; GOETZ, P.J.; WINES, T.H.; SOMASUNDARAN, P. (2000). Acoustic and electroacoustic spectroscopy. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v.173, p.127–158.

DUKHIN, A.S.; OHSHIMA, H.; SHILOV, V.N.; GOETZ, P.J. (1999). Electroacoustics for concentrated dispersions, **Langmuir**, v.15, n.10, p.3445–3451.

DUPRÉ, A. (1869). **Théorie Mécanique de la Chaleur**, Paris: Gauthiers-Villars.

EPSTEIN, P.S.; CARHART, R.R. (1953). **J. Acoust. Soc. Am.**, v.25, p.533.

FERROIR, T.; HUYNH, H.T.; CHATEAU, X.; COUSSOT, P. (2004). Motion of a solid object through a pasty (thixotropic) fluid. **Phys. Fluids**, v.16, p.594.

FINNEY, E.E. (1972). Elementary concepts of rheology relevant to food texture studies. **Food Technology**, p.68–77.

FINNEY, E. E. (1973). **Elementary Concepts of Rheology Relevant to Food Texture Studies**. A. KRAMER AND A. S. SZCZESNIAK. *Texture Measurements of Foods*. eds. Boston: D. Reidel Publishing Company, p.33–51.

FONTES, S.R.; CAMINOTO, K.B. (2007). Estudo da microfiltração tangencial aplicada na clarificação do suco de açaí” In: CONGRESSO ÍBERO-AMERICANO EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DE MEMBRANAS - CITEM, 2007, Campina Grande - PB. **Anais do VI Congresso Íbero-Americano em Ciências e Tecnologia de Membranas**. Campina Grande - PB : UFRJ/UFPB, v. VI, p. 1-4., 2007.

FOWKES, F.M. (1964). Attractive forces at interfaces. **Ind. Eng. Chem.**, v.56, n.12, p.40-52.

FRENKEL, I.; GUBANOV, A. I. (1946). **Zh. Eksp. Teor. Fiz.**, v.16, p.435.

FROLOV, V.V. (1979). **Chemistry** (Vysshaya Shkola), Moscow [in Russian].

GEHRKE, T. (1996). **Reometria de Suco Concentrado de Frutas**. 52p. Tese (Mestrado) - Unicamp, Campinas, 1996.

- GIBSON, R.L.; TOKSOZ, M.N. (1989). **J. Acoust. Soc. Am.**, v.85, p.1925–1934.
- GIRARD, B.; FUKUMOTO, L. R. (2000). Membrane processing of fruit juices and beverages: a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v.40, n.2, p.91-157.
- GIRIFALCO, L.A.; GOOD, R.J. (1957). A theory for the estimation of surface and interfacial energies. I. Derivation and application to interfacial tension. **J. Phys. Chem.**, v.61, n.7, p.904-909.
- GOVIER, G.W. (1972). **The flow of complex mixtures in pipes**. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- GUNJAN, B.B.; WAGHMARE, N.J. (1987). Flow Characteristics of Pulp, Juice And Nectar of ‘Baneshan’ and ‘Neelun’ Mongoes. **Journal of Food Science and Technology**, v.24, p.20-23.
- HANEDA, R.N. (2010). **Estudo do desempenho do processo de microfiltração tangencial com membranas cerâmicas aplicado à retenção de bactérias e redução de sólidos suspensos de uma bebida à base de açaí**. 174p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- HANEDA, R.N.; FONTES, S.R. (2008). Investigation into the crossflow microfiltration process utilizing ceramic membrane applied to bacteria reduction and clarifying of açai juice. **Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition**, Boston, Massachusetts, USA.
- HARKER, A.H.; TEMPLE, J.A.G. (1988). **J. Phys. D.: Appl. Phys.**, v.21, p.1576–1588.
- HOLDSWORTH, S.D. (1971). Applicability of rheological models to the interpretation of flow and processing behaviour of fluid food products. **Journal of Texture Studies**, v.2, n.4, p.393-418.
- HOLDSWORTH, S. D. (1993). Rheological Models Used for the Prediction of the Flow Properties of Food Products: A Literature Review. **Trans. I Chem. E.**, v.71 (part C), p.139–179.
- HOMMA, A.K.O.; FRAZÃO, D.A.C. (2002). O despertar da fruticultura amazônica. **Fruticultura em Revista**, p. 27-31, novembro.

HWANG, M.P; HAYAKAWA, K.I. (1979). A specific heat calorimeter for foods. **Journal of Food Science**, v.44, n.2, p. 435-448.

IADEROZA, M.; BALDINI, I.S.D.; BOVI, M.L.A. (1992). Anthocyanins from Fruits of Açaí (*Euterpe oleracea*, Mart.). **Tropical Science**, v.32, p.41-46.

IBARZ, A.; GONÇALVES, C.; EXPLUGAS, S. (1996). Rheology of clarified passion fruit juices. **Fruit Processing**, v.6, n.8, p.330-333.

IBARZ, A.; VICENTE, M.; GRAEL, J. (1978). Rheological Behaviour of Apple Juice e Pear Juice and Their Concentrates. **Journal of Food Engineering**, v.6, n.4, p.257-267.

JUSZCZAK, L. et al. (2004). Rheological Properties of Commercial Mustards. **Journal of Food Engineering**, v. 63, pp. 209-217.

KACHANOVSKAYA, L.D. et al. (1996). Acoustic studies of aqueous solutions of biomacromolecules. **Colloids Surfaces A**, v.106, p.103 - 107.

KARBOWIAK, T.; DEBEAUFORT, F.; VOILLEY, A. (2006). Importance of Surface Tension Characterization for Food, Pharmaceutical and Packaging Products: A Review, **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v.46, p.391–407.

KASHYAP, D.R.; VOHRA, P.K.; CHOPRA, S.; TEWARI, R. (2001). Applications of pectinases in the commercial sector: a review. **Bioresource Technology**, v.77, p.215-227.

KOCHAN, J.; WINTGENS, T.; HOCHSTRAT, R.; MELIN, T. (2009). Impact of wetting agents on the filtration performance of polymeric ultrafiltration membranes. **Desalination**, v.241, p. 34-42.

KOPONEN, J.M.; BUCHERT, J.; POUTANEN, K.S.; TÖRRÖNEN, A. R. (2008). Effect of pectinolytic juice production on the extractability and fate of bilberry and black currant anthocyanins. **Eur Food Res Technol**, v.227, p.485–494

KÜHNLA, W. et al. (2010). Impact of colloidal interactions on the flux in cross-flow microfiltration of milk at different pH values: A surface energy approach. **Journal of Membrane Science**, v.352, p.107–115.

KUSKOSKI, E.M.; FETT, P.; ASUERO, A.G. (2002). Antocianos: un grupo de pigmentos naturales. Aislamiento, identificación y propiedades. **Alimentaria**, v.2, n.61, p.61-74.

LIU, L. (2009). Application of ultrasound spectroscopy for nanoparticle sizing in high concentration suspensions: A factor analysis on the effects of concentration and frequency. **Chemical Engineering Science**, v.64, p.5036 – 5042.

LOMBRAÑA, J.I.; DIAS, J.M. (1985). Rheological and Chemical Changes on Stored Carrot Juice. **Can. Ins. Food Sci. Technol. J.**, v.18, n.3, p.213-119.

MALLADA, R.; MENENDEZ, M. (2008). Inorganic membranes: synthesis, characterization and applications. LUQUE, S.; GÓMEZ, D.; ALVAREZ, JR. **Industrial applications of porous ceramic membranes (pressure-driven processes)**. Membrane Science and Technology Series, Vol. 13, Chap. 6, Elsevier Science & Technology Books, 460p.

MANOHAR, B.; RAMAKRISHNA, P.; RAMTEKE, R.S. (1990). Effect of pectin content on flow properties of mango pulp concentrates. **Journal of Texture Studies**, v.21, p.179-190.

MARKOV, I.I. et al. (2008). The Character of the Temperature Dependence of the Surface Tension Coefficient of a Liquid Phase. **Journal of Physical Chemistry A**, v.82, n.6, p.1056-1060.

McCLEMENTS, D.J. (1991). **Adv. Colloid Interface Sci.**, v.37, p.33–72.

McCLEMENTS, D.J. (1992). **J. Acoust. Soc. Am.**, v.91, n.2, p.849–854.

McCLEMENTS, D.J. (1994). **Colloids Surf.**, v.90, p.25–35.

McCLEMENTS, D.J. (1996). Principles of Ultrasonic Droplet Size Determination in Emulsions. **Langmuir**, v.12, p.3454 - 3461.

McCLEMENTS, D.J.; POVEY, M.J.W.; JURY M.; BETSANIS E. (1990). Ultrasonic characterization of a food emulsion. **Ultrasonics**, v.28, n.4, p.266-272.

MENDES, E. (2003). Demanda pode tornar açaí raro e caro no Pará, **O Liberal**, 15 fev 2003. Disponível em www.oliberal.com.br. Acesso em: 20 abril 2004.

MENEZES, S.E.M. (2005). **Efeito da alta pressão hidrostática em polpa de açaí pré-congelada (Euterpe oleracea, Mart.)**. 83p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, 2005.

MENEZES, S.E.M.; TORRES, A.T.; SRUR, A.U.S. (2008). Valor nutricional da polpa de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) liofilizada. **Acta Amazônica**, v. 38, n.2, p.311-316.

MENJIVAR, J.A.; RHA, C.K. (1980). Viscoelastic effect in concentrated protein dispersion. **Rheol. Acta**, Darmstadt, v.19, n.2, p.212-219.

MERRILL, E.W.; STOREY, B.T. (1958). The rheology of aqueous solution of amylose and amylopectin with reference to molecular configuration and intermolecular association. **J. Polym. Sci.**, v.33, p.361.

MERTENS-TALCOTT, S.U.; RIOS, J.; JILMA-STOHLAWETZ, P.; PACHECO-PALENCIA, L.A.; MEIBOHM, B.; TALCOTT, S.T.; DERENDORF, H. (2008). Pharmacokinetics of anthocyanins and antioxidant effects after the consumption of anthocyanin-rich açaí Juice and Pulp (*Euterpe oleracea* Mart.) in Human Healthy Volunteers. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.56, p.7796–7802.

MEYER, R.S.; COOPER, K.L.; KNORR, D.; LELIEVELD, H.L.M. (2000). High-pressure sterilization of foods. **Food Technology**, v.54, n.11, p.67-72, nov.

MICHALSKI, M.C.; DESOBRY S.; HARDY, J. (1997). Food Materials Adhesion: A Review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v.37, n.7, p.591-619.

MIQUELIM, J.N.; LANNES, S.C.S. (2009). Egg albumin and guar gum influence on foam thixotropy. **Journal of Texture Studies**, v.40, p. 623-636.

MIZRAHI, S.; BERK, Z. (1971). Flow behaviour of concentrated orange juice: mathematical treatment. **Journal of Textute Studies**, v.3, n.1, p.69-79.

MIZRAHI, S.; FIRSTENBERG, R. (1975). Effect of orange composition on flow behaviour of six fold concentrate. **Journal of Textute Studies**, v.4, n.6, p.523-532.

MOLISAK-TOLWINSKA, H.; WENCEL A.; FIGASZEWSKI, Z. (1997). Impedance of polypropylene membranes hydrophelized with ethyl alcohol. **J.M.S. Pure Appl. Chem.**, v.A34, n.8, p.1413-1427.

MOLLER, P.C.F., MEWIS, J.; BONN, D. (2006). Yield Stress and Thixotropy: on the Difficulty of Measuring Yield Stress in Practice. **Soft Matter**, v. 2, pp. 274–283.

MOORE, F. (1959). The rheology of ceramic slips and bodies. **Trans. Br. Ceram. Soc.**, v.58, p.470.

MOTYKA, A. L. (1996). An introduction to rheology with emphasis on application to dispersions. **J. of Chem. Education.**, v.73, n.4, p.347–380.

MUJUMDAR, A.; BERIS, A.N.; METZNER, A.B. (2002). Transient phenomena in thixotropic Systems. **J. Non-Newt. Fluid Mech.**, v.102, p.157.

MULDER, M. (2000). Basic principles of membrane technology. **Center for membrane science and technology**, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2000. p. 560.

NAGY, S.; CHEN, C.S.; SHAW, P.E. (1993). **Fruit Juice Processing Technology**. Agscience, Inc. Albuquerque, Florida, 713p.

NINDO, C.I. et al. (2007). Rheological Properties of Blueberry Puree for Processing Applications, **LWT- Food Science and Technology**, v. 40, pp. 292-299.

NOGUEIRA, O.L. et al. (1995). **Açaí**, Coleção Plantar, 1ed. Centro de Pesquisa Agroflorestal da Amazônia Oriental, Belém, Pará, Embrapa – SPI.

NOGUEIRA, O.L.; FIGUEIREDO, F.J.C; MÜLLER, A.A. (2005). Sistema de Produção do Açaí. **Embrapa Amazônia Oriental - Sistemas de Produção**, 04, ISSN 1809-4325 Versão Eletrônica.

OLIVEIRA, M.S.P.; CARVALHO, J.E.U.; NASCIMENTO, W.L.O.; MÜLER, C.H. (2002). Cultivo do Açaizeiro para Produção de Frutos. **Circular Técnica**, n. 26, Embrapa Amazônia Oriental, Belém, Pará.

ONOFRE, P.M. (1995). **Redução da viscosidade em suco de laranja com tratamento enzimático**. 71p. Tese (Mestrado) – Unicamp, Campinas, 1995.

OZELA, E.F.; STRINGHETA, P.C.; LIMA, A.A.S.; FARIAS, M.I.T.; SANTOS, M.V. (1997). Estudo comparativo do teor de antocianinas presentes no açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) nos períodos de safra e entresafra. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DE ALIMENTOS, 2, 1997, Campinas. *Resumos...* Campinas, UNICAMP.

PACHECO-PALENCIA, L.A.; HAWKEN, P.; TALCOTT, S.T. (2007). Phytochemical, antioxidant and pigment stability of açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) as affected by clarification, ascorbic acid fortification and storage. **Food Research International**, v.40, p.620–628.

PAIVA, E.P.; LIMA, M.S.; PAIXÃO, J.A. (2009). Pectina: propriedades químicas e importância sobre a estrutura da parede celular de frutos durante o processo de maturação. **Revista Iberoamericana de Polímero**, v.10, n.4.

PALLET, D.; CABRA, L.; MATTA, V.; PEZOA-GARCÍA, N.H.; MENEZES, H.C.; ABREU, F.A.P.; DORNIER, M.; REYNES, M. (2005). Aplicação da tecnologia de membranas no processamento de sucos de frutas brasileiras. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v.22, n.2, p.427-437.

PALMER, S. J. (1976). The Effect of Temperature on Surface Tension. **Journal Physics Education**, v.11, n.2, p.119-120.

PAULA, B.; MORAES, I.V.M.; CASTILHO, C.C.; GOMES, F.S.; MATTA, V.M.; CABRAL, L.M.C. (2004). Melhoria da eficiência da clarificação de suco de maracujá pela combinação dos processos de microfiltração e enzimático. **Boletim do Centro de Pesquisas de Processamento de Alimentos**, v.22, n.2, p.311-324.

PELEGRINE, D.H. (1999). **Comportamento Reológico das Polpas de Manga e Abacaxi**. 115p. Tese (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Departamento de Engenharia de Alimentos, Campinas, 115p.

PEREIRA, E. A. et al. (2008). Influence of concentration on the steady and oscillatory shear behavior of umbu pulp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.1, p.87–90.

PRÉSTAMO, G.; ARROYO, G. (1998). High hydrostatic pressure effects on vegetables structure. **Journal of Food Science**, Chicago, v.63, n.5, p.878-881.

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

QUEIROZ, V. M. S. (2004). **Estudo experimental do escoamento e da concentração de mistura no processo de filtração tangencial de suspensões macromoleculares**. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

QUI, C.G.; RAO, M.A. (1988). Role of pulp content and particle size in yield stress of apple sauce. **Journal of Food Science**, v.53, n.4, p.1165-1170.

RAO, M.A. (1986). **Rheological Properties of Fluid Foods**. RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. Engineering Properties of Foods. eds. New York: Marcel Dekker, Inc., pp.1-47.

RAO, M.A.; COOLEY, H.J. (1982). Flow properties of tomato concentrates. **Journal of Texture Studies**, v.12, n.4, p.521-538.

RAO, K.L.; EIPESON, W.E.; RAO, P.N.S.; PATWARDHAN, M.V.; RAMANATHAN, P.K. (1985). Rheological properties of mango pulp and concentrates. **Journal of Food Science and Technology**, v.22, n.1, p.30-33.

RAO, M.A.; RIZVI, S.S. (1986). **Engineering Properties of Foods**. New York, Marcel Dekker.

RAO, M.A.; STEFFE, J.F. (1992). **Viscoelastic properties of foods**. NY, USA: Elsevier Applied Science.

RIPPERGER, S.; GREIN, T. (2007). Filtration method with membrane and their modeling. **Chem. Ing. Technol**, v.79, p.1765–1776.

ROGEZ, H. (2000). Açaí: preparo, composição e melhoramento da conservação. **Ed. Universidade Federal do Pará – EDUPA**, Belém, Pará, 300p.

ROSENTHAL, A.; SILVA, J.L. (1997). Alimentos sob pressão. **Engenharia de alimentos**, n.14, p. 37-39.

SANGRONIS, E.; POTHAKAMURY, U.; RAMOS, A. M.; IBARZ, A.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. (1997). La alta presión hidrostática: una alternativa en el procesamiento no térmico de alimentos. **Alimentaria**, n.33, p.33-43, jun.

SAN-MARTÍN, M.F.; BARBOSA-CÁNOVAS, G.V.; SWANSON, B.G. (2002). Food processing by high hydrostatic pressure. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v.42, n.6, p.627-645.

SARAVACOS, G.D. (1968). Tube Viscosimetry of Fruit Purees and juices. **Food Technology**, v.22, n.12, p.1585-1588.

SARAVACOS, G.D. (1970). Effect of Temperature on Viscosity of Fruit Juices and Purees. **Journal of Food Science**, v. 35, pp.90-105.

SARAVACOS, G.C.; MOYER, J.C. (1967). **Tube viscometry of tomato juice and concentrates**. Agriculture Experiment Station, Cornell University, Department of Food Science and Technogy, Geneva, N.Y., New York State, 11p.

SATO, A.C.K.; Cunha, R. L. (2009). Effect of Particle Size on Rheological Properties of Jaboticaba Pulp. **Journal of Food Engineering**, v. 91, n. 4, pp.566-570.

SCOTT, K. (1995). **Handbook of industrial membranes**. Elsevier Science Publishers, Oxford.

SILVA, F.C. DA, GUIMARÃES, D.H.P.; GASPARETO, C.A. (2005). Reologia do Suco de Acerola: Efeitos da Concentração e Temperatura. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.25, n.1, pp.121-126.

SILVA E SILVA, B.M.; MORO, F.V.; SADER, R.; KOBORI, N.N. (2007). **Influência da Posição e da Profundidade de semeadura na emergência de plântulas de açaí**. **Revista Brasileira Frutic**, Jaboticabal, v.29, n.1, abr.

SKELLAND, A.H.P. (1967). **Non-Newtonian flow and heat transfer**. NewYork, John Wiley & Sons, 469p.

SOUTO, R.N.M. (2001). **Uso da radiação γ , combinada à refrigeração, na conservação de polpa de açaí (*Euterpe oleracea*, Mart.)**. 95p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, 2001.

STEFFE, J. F. (1992). **Rheological Methods in Food Process Engineering**. East Lansing, MI: Freeman Press.

STEFFE, J.F. (1996). **Rheological methods in food process engineering**. 2nd ed., East Lansing, MI, USA: Freeman Press.

STEFFE, J.F.; MOHAMED, I.O.; FORD, E.W. (1986). **Rheological properties of fluids foods: data compilation**. In: M. R. Okos (Ed.), Physical and chemical properties of food. St Joseph, MI, USA: American Society of agricultural engineers, p.1–13.

TABILO-MUNIZAGA, G.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. (2005). Rheology for the food industry. **Journal of Food Engineering**, v.67, p.147–156.

TANGLERTPAIBUL, T.; RAO, M.A. (1987). Rheological properties of tomato concentrates as affected by particles size and methods of concentration. **Journal of Food Science**, v.52, n.1, p.141-145.

TINOCO, A. C. (2005). Açaí amazônico: novas perspectivas de negócio. Belém, Para: Embrapa Amazônia Oriental. In: WORKSHOP REGIONAL DO AÇAIZEIRO: PESQUISA, PRODUÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO, 2005, Belém, Para. 1 CD-ROM.

TIZIANI, S.; VODOVOTZ, Y. (2005). Rheological effects of soy protein addition on tomato juice. **Food Hydrocolloids**, v.19, n.1, pp.45–52.

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

TREVISOLI, A.M.S. (2010). **Estudo experimental da microfiltração tangencial com membrana cerâmica aplicada na clarificação da vinhaça**. 155p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

UENOJO, M.; PASTORE, G.M. (2007). Pectinases: aplicações industriais e perspectivas. **Química Nova**, v.30, n.2, p.388-394.

USHIKUBO, FY. (2006). **Efeito do tratamento enzimático, da velocidade tangencial e da pressão transmembrana na microfiltração da polpa diluída de umbu (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.)**. 117p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 117p, 2006.

- VAILLANT, F.; MILLAN, P.; O'BRIEN, G.; DORNIER, M.; DECLOUX, M.; REYNES, M. (1999). Crossflow microfiltration of passion fruit juice after partial enzymatic Liquefaction. **Journal of Food Engineering**, v.42, p.215-224.
- VANDRESEN, S. et al. (2009). Temperature Effect on the Rheological Behavior of Carrot Juices. **Journal of Food Engineering**, v.92, n.3, pp.269-274.
- VAN OSS, C.J.; CHAUDHURY, M.K.; GOOD, R.J. (1988). Interfacial Lifshitz-van der Waals interactions in macroscopic systems. **Chem. Rev.**, v.88, p.927-941.
- VAN WAZER, R.J.; LYONS, J.W.; KIM, K.I.; COLWELL, R.E. (1963). **Viscosity and flow measurement: a laboratory handbook of rheology**. NewYork, In Terscience Publishers, 406p.
- VARSHNEY, N.N; KUMBHAR, B.K. (1978). Effect of Concentration and Temperature on Rheological Properties of Pineapple and Orange Juices. **Journal of Food Science and Technology**, v.15, n.2, p.53-55.
- VÉLEZ-RUIZ, J. F. (1999). Rheology of dairy products. In: Symposium of Food Rheology at the XXX Mexican Congress of Food Science and Technology. Conference... Veracruz, Ver., Mexico.
- VÉLEZ-RUIZ, J.F.; BARBOSA-CÁNOVAS, G.V. (1997). Rheological properties of selected dairy products. **Crit. Rev. Fd. Sci. & Nutr.**, v.37, n.4, p.311–359.
- VIDAL, J.R.M.B. (1997). Estudo **reológico do suco de manga – efeito dos sólidos solúveis e insolúveis**. 79p. Tese (Mestrado) - Unicamp, Campinas, 1997.
- VIDAL, J.R.M.B. (2000). **Comportamento reológico da polpa de manga**. 159p. Dissertação (doutorado) - Unicamp, Campinas, 2000
- VITALI, A.A.; RAO, M.A. (1982). Flow behaviour of guavapuree as a function of temperature and concentration. **Journal of Texture Studies**, v.13, p.275-289.
- WALLS, H. J.; CAINES, S.B.; SANCHEZ, A.M.; KHANB, S.A. (2003). Yield stress and wall slip phenomena in colloidal silica gels. **J. Rheol.**, v.47, n.4, pp.847-868.
- WATERMAN, P.S.; TRUELL, R.J. (1961). **Math. Phys.**, v.2, p.512.

WEIPERT, D.; TSCHEUSCHNER, H. D.; WINDHAD, E. (1993). **Rheologie de Lebensmittel**. Hamburg, Germany: B. Behr's Verlag GmbH and Co.

WHITAKER, J.R.; VORAGEN, A.G.J.; WONG, D.W.S. (2003). **Handbook of food enzymology**. Marcel Dekker, Inc., 1079p.

WONG, D. (2008). Enzymatic Deconstruction of Backbone Structures of the Ramified Regions in Pectins. **Protein J**, v.27, p.30–42.

YOUNG, T. (1805). An assay on the cohesion of fluids, **Phil.Trans. Roy. Soc.**, v.95, p.65-87.

YU, J; LENCKI, R.W. (2004). Effect of Enzyme Treatments on the Fouling Behavior of Apple Juice During Microfiltration. **Journal of Food Engineering**, v.63, p.413-423.

YUYAMA, L.K.O.; AGUIAR, J.P.L.; MELO, T.; BARROS, S.E.; FILHO, D.F.S.; YUYAMA, K.; FAVARO, D.I.T.; VASCONCELLOS, M.; PIMENTEL, S.A.; BADOLATO, E.S.G. (2004). Açaí (*Euterpe oleracea* Mart.): Qual o seu potencial nutricional? In: XVII Congresso Brasileiro de Fruticultura, 2004, Florianópolis. Santa Catarina: Sociedade Brasileira de Fruticultura.

ZEMAN, L.J.; ZYDNEY, A.L. (1996). **Microfiltration and Ultrafiltration - Principles and Applications**. 1. ed., Marcel Dekker, New York.