



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA - UFPB
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CCT
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS

COMPORTAMENTO REOLÓGICO
DA POLPA DE GOIABA (*Psidium guajava*, L)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ROBSON SILVESTRE DA CONCEIÇÃO

Campina Grande – Paraíba
(FEVEREIRO – 2000)

COMPORTAMENTO REOLÓGICO DA POLPA DE GOIABA
(*Psidium guajava*, L)

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento as exigências para obtenção do grau de mestre.

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

AUTOR: *Robson Silvestre da Conceição*

ORIENTADORA: *Maria Elita Duarte Braga*

CO-ORIENTADOR: *Alexandre José de Melo Queiroz*

CAMPINA GRANDE - PB
(FEVEREIRO – 2000)



C744c Conceicao, Robson Silvestre da
Comportamento reologico da polpa de goiaba (*Psidium guajava*, L) / Robson Silvestre da Conceicao. - Campina Grande, 2000.
68 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Agricola) - Universidade Federal da Paraiba - Centro de Ciencias e Tecnologia.

1. Reologia 2. Goiaba 3. Pectina 4. Dissertacao I. Braga, Maria Elita Duarte, Dra. II. Queiroz, Alexandre Jose de Melo, Dr. III. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 532.135(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

COPEAG - PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

ROBSON SILVESTRE DA CONCEIÇÃO

Título: "Comportamento Reológico da Polpa de Goiaba (*Psidium guajava*, L.)".

BANCA EXAMINADORA

PARECER

Meliton
Prof. Dra. Maria Elita D. Braga-Orientadora

APROVADO COM DISTINÇÃO

Alexandre
Prof. Dr. Alexandre José de M. Queiroz-Co-Orientador

APROVADO COM DISTINÇÃO

Mário Eduardo R.M.C. Mata
Prof. Dr. Mário Eduardo R.M.C. Mata-Examinador

APROVADO COM DISTINÇÃO

Carlos Alberto Gasparetto
Dr. Carlos Alberto Gasparetto-Examinador

APROVADO COM DISTINÇÃO

Campina Grande, 02 de fevereiro de 2000

DEDICO

A minha mãe, Marinete Silvestre Bastos, que sempre me deu força em todas as etapas dos meus estudos e da minha vida.

A Gilvanete Maria Ferreira que foi minha grande parceira nestes anos, sempre me auxiliando nas horas mais difíceis.

Aos meus avôs Silvestre Bastos dos Santos e Sebastiana Silvestre Bastos, que mesmo não estando mais entre nós, sempre estarão torcendo por mim e todos os meus familiares.

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Maria Elita, que sempre se mostrou uma pessoa muito atenciosa para discussões a respeito do trabalho e uma amiga.

Ao Prof. Dr. Alexandre Queiroz pela co-orientação e dedicação durante todas as etapas da realização do trabalho e pela sua amizade.

À Profa. Dra. Rossana Maria Feitosa que sempre me recebeu bem em seu laboratório e pelas suas sugestões para realização do experimento, que foram de grande importância.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade de realização deste trabalho.

A CAPES, pela bolsa concedida durante a realização deste trabalho.

À Profa. Dra. Laura, Chefe do Laboratório de Engenharia de Materiais onde foram realizado os ensaios reológicos e aos funcionários e alunos deste departamento.

Ao meu amigo João Guarabira uma das primeiras pessoas que conheci quando cheguei à Campina Grande e que até hoje se mostra um grande amigo.

A Rivanilda secretária da Pós-Graduação de Engenharia Agrícola, uma pessoa formidável, uma grande amiga.

Aos Professores, funcionários e alunos do Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola.

À todos os amigos que fiz ao longo dos anos em Campina Grande.

ÍNDICE

| | |
|---|------------|
| LISTA DE FIGURAS..... | iv |
| LISTA DE TABELAS | vi |
| LISTA DE SÍMBOLOS | vii |
| RESUMO..... | ix |
| SUMMARY | x |
| | |
| 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 - Objetivos | 3 |
| | |
| 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 2.1 - Goiaba | 4 |
| 2.2 - Padrões de comportamento reológico dos fluidos..... | 6 |
| 2.2.1 - Fluidos newtonianos | 6 |
| 2.2.2 - Fluidos não newtonianos | 6 |
| 2.3 – Modelos reológicos | 8 |
| 2.3.1 - Modelo newtoniano | 8 |
| 2.3.2 - Modelo não-newtoniano | 9 |
| 2.3.2.1 - Modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência)..... | 9 |
| 2.3.2.2 – Modelos com tensão inicial..... | 10 |
| 2.3.2.2.1 - Modelo de Casson..... | 11 |
| 2.3.2.2.2 - Modelo de Herschel-Bulkley | 11 |
| 2.3.2.2.3 - Modelo de Bingham..... | 12 |
| 2.3.2.2.4 - Modelo de Mizrahi-Berk | 13 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4 – Sistemas de medição..... | 14 |
| 2.4.1 – Viscosímetro rotativo..... | 14 |
| 2.4.1.1 – Viscosímetro de cilindros concêntricos..... | 14 |
| 2.4.1.2 – Equações fundamentais para o viscosímetro rotativo de cilindros concêntricos..... | 17 |
| 2.5 – Purê ou polpa de frutas..... | 20 |
| 2.6 - Reologia de sucos e purês de frutas..... | 20 |
| 2.7 – Reometria de sucos e purês de frutas utilizando reômetros de cilindros concêntricos..... | 23 |
| 2.8 - Influência da pectina..... | 24 |
| | |
| 3 - MATERIAIS E MÉTODOS..... | 27 |
| 3.1 - Aquisição e processamento do material..... | 27 |
| 3.2 - Caracterização da polpa..... | 29 |
| 3.2.1 - pH..... | 29 |
| 3.2.2-Brix..... | 29 |
| 3.2.3 - Pectinas..... | 29 |
| 3.2.4 - Tipos de material utilizados..... | 30 |
| 3.2.5 - Preparação do material “natural”..... | 30 |
| 3.2.6 - Preparação do material "despectinizado"..... | 30 |
| 3.3 - Medição das propriedades reológicas..... | 30 |
| 3.4 – Tratamento dos dados experimentais..... | 32 |
| 3.4.1 – Conversão dos dados experimentais..... | 32 |
| 3.4.1.1 – Tensão de cisalhamento..... | 32 |
| 3.4.1.2 – Índice de comportamento de fluxo..... | 33 |
| 3.4.1.3 – Taxa de cisalhamento..... | 33 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4.1.4 – Viscosidade aparente..... | 33 |
| 3.4.2 – Análise matemática..... | 34 |
| 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 35 |
| 4.1 – Caracterização do material..... | 35 |
| 4.2 – Reometria..... | 35 |
| 4.2.1 – Modelo de Ostwald-de-Waele..... | 41 |
| 4.2.2 – Modelo de Casson..... | 43 |
| 4.2.3 – Modelo de Herschel-Bulkley..... | 45 |
| 5 – CONCLUSÕES..... | 48 |
| 6 – SUGESTÕES..... | 48 |
| 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 48 |
| APÊNDICE A..... | 48 |
| APÊNDICE B..... | 48 |
| APÊNDICE C..... | 48 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 01 - Comportamento Reológico de fluidos newtoniano e não-newtoniano independentes do tempo | 7 |
| Figura 02 - Curvas de escoamento para fluidos com comportamento dependente do tempo | 8 |
| Figura 03 - Sistema Couette | 15 |
| Figura 04 - Sistema Searle | 16 |
| Figura 05 - Fluxograma para obtenção da polpa de goiaba | 28 |
| Figura 06 - Esquema do aparato utilizado para realização dos experimentos | 31 |
| Figura 07 - Reograma confeccionado a partir das médias das leituras obtidas com polpa de goiaba “in natura” para temperaturas de 30 a 60°C | 37 |
| Figura 08 - Reograma confeccionado a partir das médias das leituras obtidas com polpa de goiaba com concentração 0,001% para temperaturas de 30 a 60°C | 38 |
| Figura 09 - Reograma confeccionado a partir das médias das leituras obtidas com polpa de goiaba com concentração 0,0013% para temperaturas de 30 a 60°C | 39 |
| Figura 10 - Reograma confeccionado a partir das médias das leituras obtidas com polpa de goiaba com concentração 0,0018% para temperaturas de 30 a 60°C | 40 |

| | |
|---|----|
| Figura 11 - Polpa de goiaba – Índice de consistência em função da temperatura – Ajuste pelo modelo de Ostwald-de-Waele | 47 |
| Figura 12 - Polpa de goiaba – Índice de consistência em função da temperatura – Ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley | 48 |
| Figura 13 - Polpa de goiaba – Tensão inicial em função da temperatura – Ajuste pelo modelo de Casson | 49 |
| Figura 14 - Polpa de goiaba – Tensão inicial em função da temperatura – Ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley | 49 |
| Figura 15 - Polpa de goiaba “in natura” – Tensão de Cisalhamento em função da taxa de deformação – Ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley | 50 |
| Figura 16 - Polpa de goiaba com concentração de 0,001% de enzima – Tensão de deformação em função da taxa de deformação – Ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley | 51 |
| Figura 17 - Polpa de goiaba com concentração de 0,0013% de enzima – Tensão de Cisalhamento em função da taxa de deformação – ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley | 51 |
| Figura 18 - Polpa de goiaba com concentração de 0,0018% de enzima – Tensão de Cisalhamento em função da taxa de deformação – ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley | 52 |
| Figura 19 - Polpa de goiaba – Tensão de Cisalhamento em função da taxa de deformação – Ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley à temperatura de 40°C para as amostras utilizadas | 53 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 01- Composição química da polpa de quatro diferentes variedades de goiaba ... | 5 |
| Tabela 02 - Fatores de conversão para os splindles do viscosímetro Brookfield R.V.T | 32 |
| Tabela 03 - Características físico-químicas da polpa de goiaba | 35 |
| Tabela 04 - Concentrações e Temperaturas usadas para a construção dos reogramas ... | 36 |
| Tabela 05 - Resultados dos parâmetros ajustados para o modelo de Ostwald-de-Waele para a polpa de goiaba | 41 |
| Tabela 06 - Resultados dos parâmetros ajustados para o modelo de Casson para a polpa de goiaba | 43 |
| Tabela 07 - Resultados dos parâmetros ajustados para o modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de goiaba | 45 |

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_1 – Constante de construção do viscosímetro
- A_2 - Constante de construção do viscosímetro
- H – Altura equivalente de imersão do spindle (m)
- K – Constante da mola de torção (adimensional)
- k – Fator de consistência (Pa.s)
- k_{at} – Fator que corresponde ao spindle utilizado (adimensional)
- k_c e k_{oc} – Constantes do modelo de Casson, em Pa.s e $(Pa)^{0,5}$ respectivamente
- k_H - Fator de consistência no modelo de Herschel-Bulkley ($Pa.s^n$)
- k_M - Fator de consistência no modelo de Mizrahi-Berk ($Pa.s^n$)
- k_{ny} – Fator que é função do índice de fluxo e do spindle utilizado (adimensional)
- k_{OM} – Raiz quadrada da tensão inicial do modelo de Mizrahi-Berk (Pa)
- n – Índice de comportamento de fluxo (adimensional)
- N – Velocidade de rotação (rpm)
- N_1 – Velocidade de rotação do viscosímetro (rpm)
- n_H - Índice de comportamento de fluxo no modelo de Herschel-Bulkley (adimensional)
- n_M - Índice de comportamento de fluxo no modelo de Mizrahi-Berk (adimensional)
- R_1 – Raio do cilindro interno (m)
- R_2 – Raio do cilindro externo (m)

LETRAS GREGAS

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

θ - Deflexão (graus ou N.m)

β - Razão entre R_1 e R_2 (m)

ψ - Taxa de cisalhamento (s^{-1})

τ - Tensão de cisalhamento (Pa)

ω - Velocidade angular (rpm)

μ - Viscosidade absoluta (Pa.s)

η - Viscosidade aparente (Pa.s)

$\mu\rho$ - Viscosidade plástica de Bingham

α_1 - Leitura do dial do viscosímetro (graus)

τ_1 - Tensão de cisalhamento (Pa)

τ_b - Tensão de cisalhante na parede do cilindro interno (Pa)

τ_L - Limite de escoamento

τ_o - Tensão de inicial (Pa)

τ_{OH} - Tensão de inicial no modelo de Herschel-Bulkley (Pa)

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi determinar a influência da adição da enzima pectinase no comportamento reológico da polpa de goiaba. Para isso utilizou-se polpa “in natura” e polpa com adição de enzima pectinolítica (pectinase) nas proporções de 0,001, 0,0013 e 0,0018 nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70°C. As análises foram conduzidas num viscosímetro Brookfield, modelo RVT com geometria de cilindros concêntricos. Em todas as amostras, as polpas apresentaram um comportamento não-newtoniano com características pseudoplásticas. Os dados experimentais foram ajustados pelos modelos de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), Casson e Herschel-Bulkley, sendo o modelo de Herschel-Bulkley, o que melhor se ajustou aos dados experimentais. Os resultados obtidos mostraram que o índice de consistência (k) decresceu com o aumento do teor de enzima pectinase adicionada e decresceu com o aumento da temperatura. Os valores do índice de comportamento de fluxo (n) não apresentaram uma tendência definida, impossibilitando assim determinar uma relação entre a temperatura e a polpa de goiaba com adição de enzima pectinase sobre este parâmetro.

SUMMARY

The aim of this paper was to determine the influence added on pectinase enzyme on the rheological behaviour of the guava pulp. In order to reach such goal, it was used the pulp "in natura" and also the pulp added on pectinolytic enzyme (pectinase) in proportions of the 0,001, 0,0013 and 0,001 in temperatures of 30, 40, 50, 60 and 70°C. The analyses were done in a viscometer of Brookfield model RVT shaped in concentric cylinders. In all the samples observed, the pulps showed a behaviour non-Newtonian with pseudoplastics characteristics. The experimental data were adjusted by the models of Ostwald-de-Waele (Power Law) Casson and Herschel-Bulkley. The model by Herschel-Bulkley, however, was the one which best fitted on the experimental data. The results showed that the consistency index (**k**) was reduced with the added pectinase enzyme content increasing and with the temperature increasing as well. The values of the flow behaviour index (**n**) did not show a well defined tendency which became impossible to determine a relation between the temperature and the pectinase enzyme within this parameter.

1 - INTRODUÇÃO

O extenso território brasileiro, caracterizado por variadas condições climáticas e por distintos tipos de solos, apresenta uma produção agrícola extremamente diversificada, que confere ao país o título de principal produtor mundial de vários itens. No Brasil a fruticultura apesar de representar cerca de 5% das áreas cultivadas, colocando-o em primeiro lugar entre os produtores de frutas *in natura*, apenas 1% da sua produção de frutas frescas destina-se a exportação, ocupando apenas o 20º lugar entre os países exportadores de frutas frescas (CUNHA *et alii*, 1994).

A fruticultura no Nordeste brasileiro desponta, hoje, como uma excelente atividade de mercado. Basicamente, essa realidade se deve à adaptação de inúmeras fruteiras às condições de clima e solo da região. Outros fatores são as áreas irrigadas que cresceram nos últimos anos, propiciando ao fruticultor da região altos níveis de produtividade.

Dentre as frutas que estão sendo comercialmente exploradas no Nordeste, a goiaba recebe uma especial atenção, pois tem amplas possibilidades de consumo nos mercados interno e externo. A goiaba é uma das principais matérias-primas utilizadas pela indústria brasileira de conservas, permitindo várias formas de aproveitamento: purê ou polpa, néctar, suco, compota, sorvete e doce.

A produção nacional de goiaba se expandiu de 1988 a 1990, quando cresceu 10% em volume e 18% em área plantada, atingindo 230,4 mil toneladas. Já em 1991, a produção retrocedeu a 213,9 mil toneladas em função de uma redução da área plantada que situou-se em 6,8 mil hectares, 15% a menos que no ano anterior. Nordeste e Sudeste respondem, juntos, por 94% da produção nacional. O nordeste lidera com 108 mil toneladas, ou 51% do total, enquanto o sudeste segue com 43% da produção (CUNHA *et alii*, 1994).

Nos últimos anos ocorreu um grande avanço tecnológico por parte dos fruticultores, devido à demanda do mercado externo, entretanto, para se colocar as frutas no mercado, exige-se uma série de conhecimentos a respeito das características dos produtos, com vista à adaptação dos processos e das instalações industriais para cada produto. A par dessas novas tecnologias estão os estudos das propriedades reológicas, que são úteis para o desenvolvimento de produtos e para a correlação de parâmetros físicos com a avaliação sensorial.

No projeto de equipamentos destinados ao processamento de produtos derivados de frutas como sucos e purês, os estudos reológicos são importantes no dimensionamento de equipamentos como bombas, tubulações, trocadores de calor, evaporadores, misturadores e filtros. Muitos trabalhos de reologia de sucos e purês foram feitos com relação as concentrações de sólidos solúveis e valores de temperatura. Outros trabalhos tratam da influência das diferentes parcelas, no que se referem a dimensões e teores, das partículas insolúveis importantes para a elaboração de novos produtos. Contudo, recentemente começaram a surgir trabalhos referindo-se a substâncias pécticas.

As substâncias pécticas tornaram-se de vital interesse para produtores de sucos cítricos congelados, devido a problemas na clarificação. Muitos processos de fabricação de suco de frutas diversas empregam enzimas pectinolíticas para solucionar problemas no processamento. As enzimas pectinolíticas são usadas na preparação de suco de maçã, e de outros sucos de frutas para facilitar a prensagem ou extração do suco e para auxiliar na separação do precipitado flocofento por sedimentação, filtração ou centrifugação. A necessidade do tratamento com enzimas varia com o tipo da fruta e dificuldades associadas a produção (BRAZ & SANTIAGO, 1993).

1.1 - Objetivos

Portanto este trabalho teve como objetivo:

- Estudar o comportamento reológico da polpa de goiaba na faixa de temperaturas de 30 a 70°C nas condições do produto “in natura” e com adição de diferentes proporções de pectinase (0,001, 0,0013 e 0,0018%), para.
- Determinar os parâmetros reológicos utilizando-se os modelos de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), Casson e Herschel-Bulkley.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Goiaba

A goiabeira (*Psidium guajava*, L.) é uma planta originária da região tropical da América do Sul. Atualmente, esta espécie encontrada-se amplamente difundida por todas as regiões subtropicais e tropicais do mundo, em virtude da sua fácil adaptação a diferentes condições edafoclimáticas, bem como da facilidade de propagação através de sementes. Os frutos da goiabeira são amplamente empregados na indústria sob múltiplas formas, sendo o produto principal a goiabada. Além desta encontramos o purê ou polpa, néctar, suco, compota sorvete, geléia e frutas em caldas, porém, o consumo "in natura" está crescendo a partir da aceitação de seu sabor por parte dos consumidores não étnicos (NETO & SOARES, 1994).

Segundo CUNHA *et alii* (1994), a produção de goiaba cresceu bastante nos anos de 1988 à 1990. O Nordeste e Sudeste responderam por 94% da produção nacional. O mesmo autor afirma que as exportações brasileiras de goiaba "in natura" são insignificantes, devendo-se isto a diversos fatores entre os quais cabe mencionar o pouco conhecimento a respeito do produto, por parte dos consumidores nos mercados externos e a fragilidade do produto na fase pós-colheita, porém as oportunidades são melhores no comércio exterior para o produto processado, em forma de conserva enlatada ou doce.

Quanto ao aspecto químico e nutricional (Tabela 01), a goiaba tem um certo destaque quanto ao conteúdo de vitamina C, sendo, em média 60% mais rica que os frutos cítricos, 49% mais que o mamão e 15 vezes mais rica que a maçã. Também é importante citar os teores de vitamina A e fibras. Quanto ao teor de pectina pode ser considerada uma fruta rica. Este teor aumenta da casca para o interior do fruto. A goiaba apresenta uma expressiva quantidade de Cálcio e Fósforo, no entanto cerca de 80% do Ferro está nas sementes (MAIA *alii*, 1998).

Tabela 01- Composição química da polpa de quatro diferentes variedades de goiaba

| Determinações* | Variedades | | | |
|--|------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| | Patillo | Hong Kong Pink | B ₂₄ p2 | B ₁₈ p1 |
| Umidade (%) | 83,11 | 83,64 | 84,23 | 84,07 |
| Proteína (%) | 0,66 | 0,64 | 0,63 | 0,62 |
| Lipídios (%) | 0,54 | 0,56 | 0,43 | 0,56 |
| Cinzas (%) | 0,52 | 0,44 | 0,50 | 0,52 |
| Fibra (%) | 4,58 | 4,58 | 4,58 | 4,58 |
| Pectina (%) | 0,83 | 0,87 | 0,96 | 0,98 |
| Glicídios redutores (glicose %) | 7,13 | 6,99 | 6,75 | 7,09 |
| Glicídios não redutores (sacarose %) | 0,75 | 0,70 | 0,64 | 0,71 |
| PH | 3,82 | 3,97 | 4,05 | 3,89 |
| Sólidos solúveis (°Brix) | 12,10 | 11,80 | 11,00 | 12,00 |
| Acidez titulável total (ácido cítrico %) | 0,50 | 0,45 | 0,40 | 0,43 |
| Ácido ascórbico (mg/100g) | 115,81 | 106,44 | 87,47 | 78,63 |
| Fósforo (mg/100g) | 28,23 | 23,98 | 30,11 | 27,43 |
| Cálcio (mg/100g) | 21,79 | 20,25 | 20,90 | 16,00 |
| Ferro (mg/100g) | 0,74 | 0,97 | 0,64 | 0,83 |

* Média de 3 determinações

Fonte: Maia *et alii* (1998)

2.2 - Padrões de comportamento reológico dos fluidos

Os fluidos em geral são classificados em função do seu comportamento reológico. Este, envolve a determinação e análise da relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade, que é chamado de taxa de deformação, para uma determinada condição de temperatura e pressão. Dividi-se o comportamento reológico dos fluidos em duas categorias: newtoniano e não-newtoniano.

2.2.1 - Fluidos newtonianos

Os fluidos são newtonianos quando a viscosidade só é influenciada pela temperatura e pressão. Portanto, no escoamento de um fluido newtoniano, em regime laminar, existe uma relação linear entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação. Uma única determinação experimental é suficiente para definir o único parâmetro reológico do fluido newtoniano, a sua viscosidade absoluta, pois a razão entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação é constante. Entre os alimentos que exibem comportamento newtoniano estão as bebidas carbonatadas, os extratos de carne e água (MULLER, 1977).

2.2.2 - Fluidos não newtonianos

Fluidos não newtonianos com propriedades reológicas independentes do tempo são divididos nas categorias: pseudoplásticos e dilatantes, dependendo se a viscosidade aparente decresce ou aumenta, respectivamente, com a taxa de deformação. Os fluidos dependentes do tempo são classificados em reopéticos e tixotrópicos. Eles são reopéticos quando a tensão de cisalhamento aumenta com o tempo, mantendo-se a mesma taxa de deformação. Enquanto, os fluidos tixotrópicos apresentam efeito contrário, isto é, a tensão de cisalhamento diminui com o tempo de aplicação de uma certa taxa de deformação (GASPARETTO & GEHRKE, 1995).

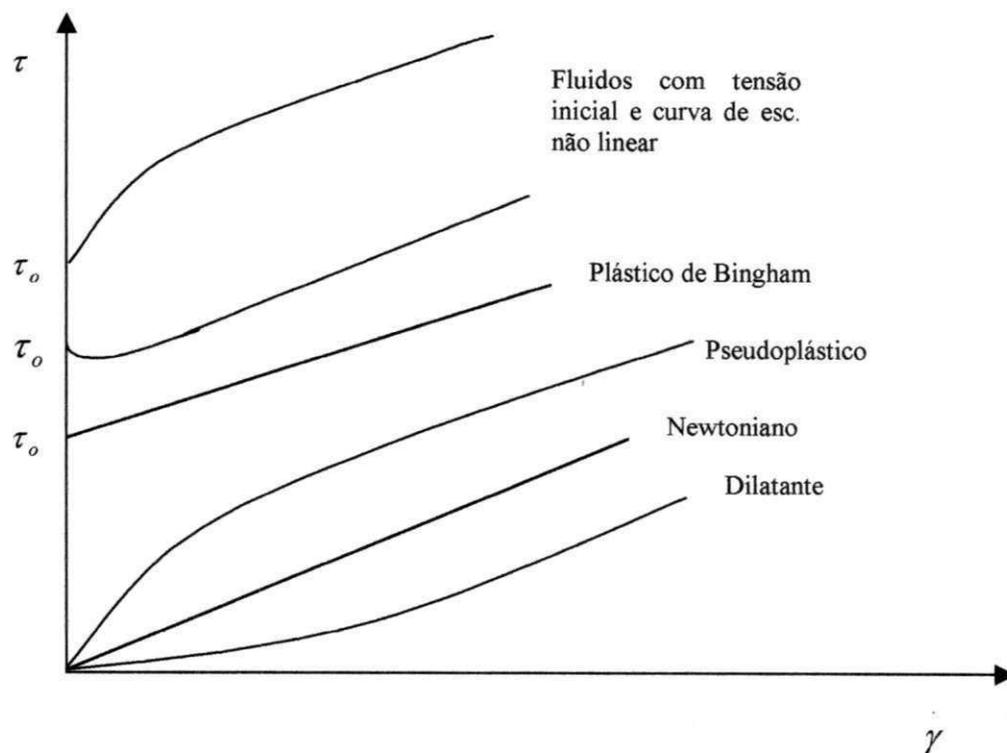


Figura 01- Comportamento Reológico de fluidos newtonianos e não-newtonianos independentes do tempo.

A reologia de qualquer sistema é avaliada tipicamente pela medida e análise das curvas de comportamento obtidas usando um reômetro adequado. Quando estuda-se o comportamento dos produtos, tenta-se sempre representá-los pelos modelos mais convenientes e preferencialmente aqueles mais usados, dessa maneira é possível comparar resultados obtidos por diferentes pesquisadores (GASPARETTO & GEHRKE, 1995).

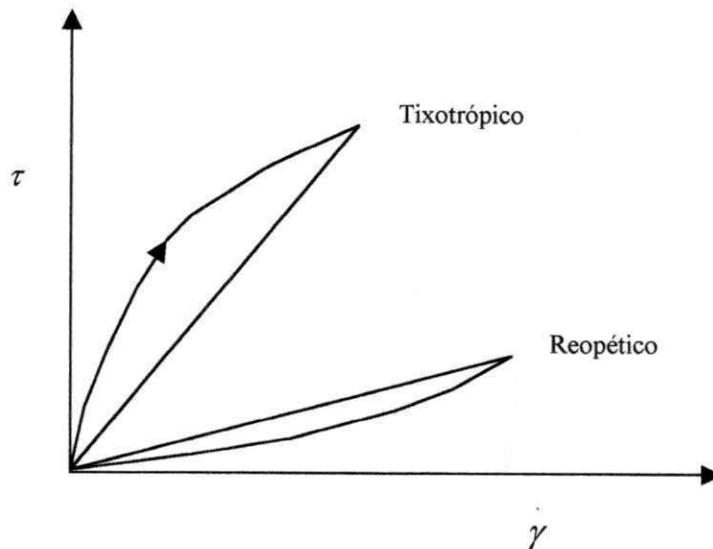


Figura 02 - Curvas de escoamento para fluidos com comportamento dependente do tempo

2.3 – Modelos reológicos

2.3.1 - Modelo newtoniano

Inúmeros produtos alimentícios em forma de solução aquosa, solução de sacarose, sucos de frutas clarificados, apresentam comportamento newtoniano (Rao citado por QUEIROZ, 1998). O suco clarificado de *solanum topiro* apresenta um comportamento newtoniano (TELLO *et alii*, 1996).

Matematicamente, os fluidos newtonianos são definidos pela equação:

$$\tau = \mu \times \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

onde:

τ = Tensão de cisalhamento (N.m⁻²=Pa)

μ = Viscosidade (Pa.s)

$\dot{\gamma}$ = Taxa de deformação (s⁻¹)

A representação gráfica, curva de fluxo ou reograma dos fluidos newtonianos apresentam relação linear. O reograma em coordenadas cartesianas, de um fluido newtoniano é linear e passa pela origem, sendo a sua inclinação igual a viscosidade do fluido. Pode-se analisar o comportamento de um fluido através da relação entre a sua viscosidade e a taxa de deformação. Para os fluidos newtonianos, esta relação é uma reta paralela ao eixo das taxas de deformação.

2.3.2 - Modelo não-newtoniano

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

O modelo da Lei da Potência também conhecido como modelo de Ostwald-de-Waele, não se aplica para todo e qualquer fluido, nem a todo intervalo de taxa de deformação. Entretanto, para fluidos não-newtoniano (pseudoplástico e dilatantes) é bastante utilizado, pela sua simplicidade (Rao e Awanteswaram citado por QUEIROZ, 1998).

A expressão matemática que define o modelo é:

$$\tau = k \left(\dot{\gamma} \right)^n \quad (2.2)$$

ou

$$\log \tau = \log k + n \log \dot{\gamma}$$

onde:

k = Fator de consistência ou índice de consistência (Pa.sⁿ).

n = Índice de comportamento de fluxo (adimensional)

sendo a viscosidade aparente dada por:

$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = k \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.3)$$

2.3.2.2 – Modelos com tensão inicial

Alguns fluidos não-newtoniano não podem ser descritos pelo modelo da potência, pois devido a sua estrutura interna, necessita de uma tensão inicial mínima para que seja iniciado o escoamento ou a movimentação do fluido. Vários autores que trabalharam com produtos derivados de frutas determinaram o parâmetro de tensão inicial, para avaliar modelos reológicos: ADORNO (1997) para suco de manga, maracujá, mamão e goiaba; BEZERRA (1996) para suco de manga e ACQUARONE *et alii* (1995) para suco de graviola.

2.3.2.2.1 - Modelo de Casson

Este modelo é usado como método oficial para a caracterização de amostras de chocolate. A tensão inicial de Casson é $\tau_{oc} = (k_{oc})^2$, a viscosidade de Casson é $\eta_c = (k_c)^2$ (RAO & STEFFE, 1997).

$$\tau^{0,5} = k_{oc} + k_c \gamma^{0,5} \quad (2.4)$$

onde, k_c e k_{oc} são constantes do modelo.

2.3.2.2.2 - Modelo de Herschel-Bulkley

O modelo de Herschel-Bulkley apresenta três parâmetros reológicos, por esse motivo é denominado também como modelo a três parâmetros. Este modelo é muito usado na reologia de derivados de frutas para se obter a tensão inicial.

$$\tau - \tau_{OH} = K_H \gamma^{n_H} \quad \begin{matrix} \sigma = K_H (\dot{\gamma})^{n_H} + \tau_{OH} \\ \epsilon = K_H (\dot{\epsilon})^{n_H} + \epsilon \end{matrix} \quad (2.5)$$

onde,

τ_{OH} = tensão inicial (N.m⁻²)

K_H = fator de consistência (Pa.sⁿ)

n_H = índice de comportamento de fluxo (adimensional)

Este modelo é uma extensão do modelo de Ostwald-de-Waele, ao qual se adiciona um novo parâmetro τ_0 , denominado de limite de escoamento real. Uma maneira de se determinar todos os três parâmetros deste modelo, consiste em primeiro estimar o valor de τ_0 por extrapolação, através do gráfico de $\tau \times \gamma$ em coordenadas cartesianas. Depois então, determinam-se os valores de ken através de um gráfico de $(\tau - \tau_0) \times \gamma$, em coordenadas logarítmicas.

De acordo com BEZERRA (1997), esse modelo deve ser resolvido através de regressão não linear, pois tem três parâmetros a serem determinados. Quando o valor de τ_{oH} for conhecido, a resolução dessa equação pode ser feita através de regressão linear. O procedimento mais empregado é determinar experimentalmente τ_{oH} ou então usar o valor estimado fora pelo modelo de Casson.

2.3.2.2.3 - Modelo de Bingham

O fluido Binghamiano ou plástico ideal requer a aplicação de uma tensão mínima τL , denominado de limite de escoamento, para que haja alguma deformação. Quando submetido a uma tensão menor do que τL , os fluidos Binghamianos se comportam como sólidos e, em princípio, só escoariam na forma de fluxo tampão. A equação matemática que define o fluido de Bingham é:

$$\tau = \mu\dot{\gamma} + \tau_0 \quad \text{para } \tau > \tau_0 \quad (2.6)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \text{para } \tau \leq \tau_0 \quad (2.7)$$

onde,

$\mu\rho$ = Viscosidade plástica

τL = Limite de escoamento

A expressão para a viscosidade aparente é:

$$\mu_a = \mu\rho + \tau L / \dot{\gamma} \quad (2.8)$$

2.3.2.2.4 - Modelo de Mizrahi-Berk

Este modelo foi desenvolvido em 1971, baseado num sistema formado por uma suspensão de partículas interagindo em solvente pseudoplástico, que se reduz ao modelo de Casson quando o índice de comportamento de fluxo (n) for igual a 0,5. BRANCO *et alii* (1995) utilizaram este modelo representado pela equação (2.9), para descrever o comportamento de suco de laranja concentrado.

$$\tau^{1/2} = K_{OM} + K_M \dot{\gamma}^{n_M} \Rightarrow V_1^{16,5} = K_{OM} + K_M (V_2)^{n_M} \quad (2.9)$$

$$V_1 = V_2 + K_M (V_3)^{n_M}$$

onde,

K_{OM} = raiz quadrada da tensão inicial

K_M = fator de consistência

n_M = índice de comportamento de fluxo

$$\frac{1}{\sqrt{x}} = x^{-1/2}$$

2.4 – Sistemas de medição

2.4.1 – Viscosímetro rotativo

O princípio deste viscosímetro baseia-se na rotação de um corpo, interno e externo, superior ou inferior, imerso em um líquido, o qual experimenta uma força de resistência viscosa. A grande vantagem destes viscosímetros é que as medidas podem ser efetuadas de modo contínuo por longos períodos de tempo, para uma certa condição de tensão e de taxa de deformação.

2.4.1.1 – Viscosímetro de cilindros concêntricos

O primeiro projeto de viscosímetro de cilindros concêntricos foi realizado por Couette em 1890. Nele, uma recipiente cilíndrico externo girava e um corpo cilíndrico interno era suportado por uma mola de torção e repousava num ponto no fundo do reservatório (Figura 03). Depois surgiu um sistema idealizado por Searle, onde o cilindro interno era quem girava com uma velocidade constante (Figura 04). Este tipo de sistema é recomendado quando se deseja um controle de temperatura rigorosa uma vez que o corpo externo permanece em repouso durante o teste. Contudo, não é recomendado para o teste de líquidos de baixa viscosidade à altas velocidades de rotação, devido a possibilidade de desenvolvimento de fluxo turbulento. Os viscosímetros do tipo Couette são mais estáveis do que do tipo Searle no que concerne à geração de forças centrífugas e, conseqüentemente, turbulência (MACHADO, 1996).

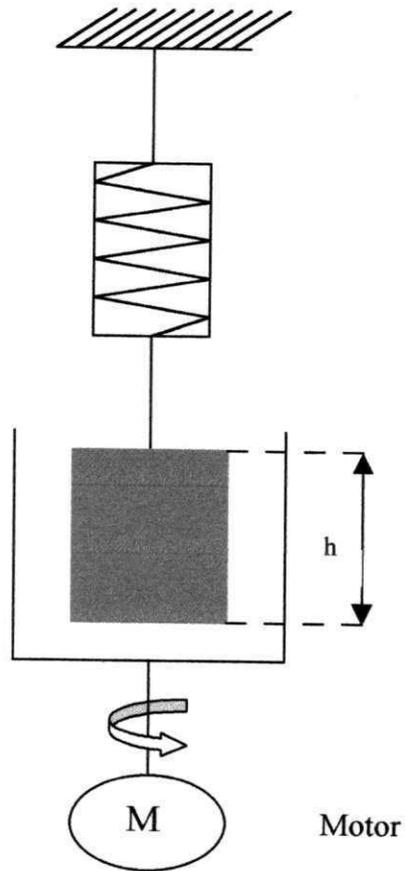


Figura 03 – Sistema Couette

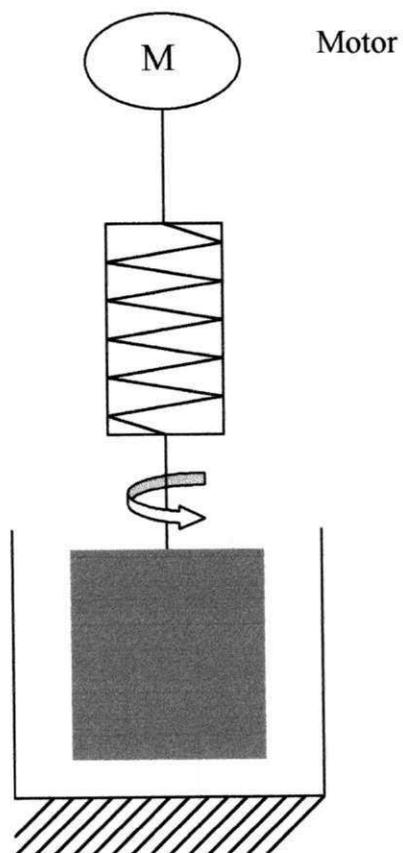


Figura 04 – Sistema Searle

2.4.1.2 – Equações fundamentais para o viscosímetro rotativo de cilindros concêntricos

Este tipo de viscosímetro fornece uma rotação constante que está associada a uma determinada taxa de deformação e a tensão de cisalhamento varia em função do raio do cilíndrico.

As equações matemáticas para o cálculo dos parâmetros reológicos deste tipo de viscosímetro são descritas por MACHADO (1996).

Os parâmetros de construção ou projeto do viscosímetro rotativo de cilindros concêntricos são o raio do cilindro interno, R_1 , o raio do cilindro externo, R_2 , em metro, a constante da mola de torção, K , e a velocidade de rotação, N em rpm. A grandeza medida diretamente pode ser a deflexão, em graus, ou o torque, em N.m, a qual é lida sobre uma escala circular (dial) ou através de um monitor digital.

As grandezas calculáveis podem ser a tensão cisalhante, em N/m^2 (Pa), a taxa de deformação, em s^{-1} , e a viscosidade, em mPa.s (cp).

A expressão para o cálculo da tensão cisalhante, deduzida para qualquer fluido em estado estacionário ou em equilíbrio dinâmico em função da leitura de deflexão, é:

$$\tau_b = \left(\frac{K}{2\pi R_1^2 H} \right) \theta \quad (2.10)$$

onde, τ_b é a tensão cisalhante na parede do cilindro interno, K é constante da mola, R_1 é o raio do cilindro interno, H é a altura equivalente de imersão, em metro, e o θ é a deflexão lida no dial ou no monitor digital.

Considerando que todos os parâmetros entre parênteses na equação 2.10 são constantes quando o projeto do viscosímetro está definido, então podemos escrever:

$$\tau_b = A_1 \cdot \theta \quad (2.11)$$

onde A_1 é uma constante que depende dos parâmetros de construção do viscosímetro e das unidades empregadas

A taxa de deformação pode ser calculada, com boa aproximação para $\beta=R_1/R_2>0,9$, a partir da velocidade angular, em rpm, aplicada no cilindro externo, pela equação:

$$\gamma_b = \psi \cdot \left(\frac{2R_2^2}{(R_2^2 - R_1^2)} \right) \cdot \varpi \quad (2.12)$$

em que, τ_b é a tensão cisalhante na parede do cilindro interno, R_2 é o raio do cilindro externo, R_1 é o raio do cilindro interno, ϖ é a velocidade angular, e ψ é uma função de β e n' , válida para fluidos generalizados, que serve para corrigir as taxas de deformação do fluxo de fluidos considerados, indevidamente, como newtonianos, conforme expressão a seguir:

$$\psi = \left(\frac{\beta^{2/n'}}{n' \beta^2} \right) \left[\frac{(\beta^2 - 1)}{(\beta^{2/n'} - 1)} \right] \quad (2.13)$$

A função de correção das taxas de deformação (ψ) será mais próxima de 1 quanto mais próximo da unidade for o valor de n . observe que quando o fluido for newtoniano, isto é, $n=1$, então a função $\psi=1$. Daí, a equação 2.12 fica:

$$\gamma_b = \left(\frac{2R_2^2}{(R_2^2 - R_1^2)} \right) \omega \quad (2.14)$$

Considerando que a velocidade angular se relaciona com o número de rotações por minuto pela expressão $\omega=(2\pi/60)N$, então a equação 2.14 pode ser descrita da forma:

$$\gamma_b = (4\pi/60) \left(\frac{2R_2^2}{(R_2^2 - R_1^2)} \right) N \quad (2.15)$$

onde, N é o número de rotações por minuto. Considerando ainda que todos os parâmetros entre parênteses da equação 2.15 são constantes para um certo projeto, então podemos reescrevê-la:

$$\tau_b = A_2 \cdot N \quad (2.16)$$

onde, A_2 é uma constante que depende dos parâmetros construtivos do viscosímetro e das unidades empregadas.

A viscosidade absoluta dos fluidos newtonianos ou aparente para os não-Newtonianos pode ser calculada pela expressão a seguir:

$$\mu_a = \frac{\tau_b}{\gamma_b} = \frac{A_1 \cdot \theta}{A_2 \cdot N} = A \cdot \left(\frac{\theta}{N} \right) \quad (2.17)$$

2.5 – Purê ou polpa de frutas

Segundo a NTA 21, do decreto nº 12.448 (Brekke *et alii* citado por TOCCHINI *et alii*, 1995), tem-se que polpa ou purê de fruta é o produto obtido pelo esmagamento das partes comestíveis das frutas carnosas, por processos adequados. De acordo com a norma em questão o produto deverá ser preparado com frutas limpas, isentas de matéria ferrosa, de parasitas e de outros detritos animais e vegetais. Não deverá conter fragmentos das partes consideradas não comestíveis das frutas, tais como casca, sementes e caroço, nem substâncias estranhas à sua composição normal, exceto as previstas pela norma.

2.6 - Reologia de sucos e purês de frutas

CHIAMPO *et alii* (1996), estudando o comportamento reológico de polpas de maçã, pêsego, pêra e damasco, usando três diferentes modelos reológicos observaram que a polpa de damasco e maçã são considerados plásticos de Bingham, uma vez que a polpa de pêra e pêsego precisaram de modelos com pelo menos três parâmetros.

QUEIROZ (1998) afirma que a viscosidade do suco de abacaxi (*Ananas comosus*, L.) decresce com a redução dos sólidos insolúveis, porém, as taxas de redução de viscosidade são diferentes das taxas de redução de sólidos.

ANTONIETTO *et alii* (1998) estudando sucos de laranja e acerola natural e concentrados, observou que o suco de laranja natural apresenta um comportamento newtoniano e o concentrado comportou-se como um pseudoplástico, ajustando-se ao modelo de Herschel-Bulkley. Já a acerola natural e concentrada, comportou-se como pseudoplástico, ajustando-se ao modelo de Ostwald-de-Waele.

ADORNO (1997) estudando o comportamento do suco de goiaba para as concentrações de 10; 15; 20; 25; 30 e 40 °Brix e temperaturas de 10; 20; 30; 40; 50 e 60°C, verificou que o modelo de Herschel-Bulkley é o que melhor se ajusta aos dados experimentais, para todas as concentrações. O mesmo autor, em seu estudo, afirma que os valores do índice de consistência (k) aumentam com o aumento do conteúdo de sólidos solúveis à temperatura constante. Quanto aos valores de índice de comportamento de fluxo (n), estes sofrem pequenas oscilações tanto à temperatura constante quanto à concentração constante.

TRIFIRO *et alii* (1994) verificaram que a Lei da Potência e o modelo de Arrhenius expressam adequadamente o efeito da temperatura nos parâmetros reológicos k (índice de consistência) e n (índice de comportamento de fluxo) de polpas de tomate, pêssego, pêra e damasco.

O modelo da Lei da Potência também foi usado por CASTALDO *et alii* (1990) para descrever o comportamento da polpa e do suco concentrado de Babaco (*Carica pentagona*), enquanto o modelo de Herschel-Bulkley foi usado somente para o suco concentrado.

VITALI & RAO (1982) estudando o comportamento de fluxo do purê de goiaba com um viscosímetro capilar observou que a viscosidade aparente diminui com o aumento da temperatura e aumenta com o aumento da concentração. O modelo de Mizrahi-Berk foi que melhor que se ajustou aos dados experimentais. O valor médio encontrado para o índice de comportamento de fluxo (n) foi de 0,43 para °Brix entre 9,8 e 16.

Segundo RAO & PALOMINO (1974) o purê de goiaba apresenta um comportamento não-newtoniano, com características de um pseudoplástico.

A tixotropia é um fenômeno que merece ser melhor estudado pelos pesquisadores que trabalham com reologia de frutas. Muitos trabalhos citam tal fenômeno mas sem se aprofundarem devido a sua grande complexidade. RAMOS & IBARZ (1998) estudando tal fenômeno no suco de laranja concentrado (45, 50, 55 e 60 °Brix) observaram que na concentração de 60 °Brix, o suco apresenta tixotropismo, enquanto nas demais concentrações não foi observado este fenômeno

GUERRERO *et alii* (1995), afirmam que o purê de manga (*Mangifera indica*, L) possui características tixotrópicas e pseudoplásticas. De acordo com os autores, o fenômeno da tixotropia pode ser explicado levando em conta que as altas concentrações de açúcar e baixo pH reduzem a viscosidade aparente por inibição da hidratação molecular e promove a interação polímero-polímero. Foi verificado que a temperatura e a atividade de água tem uma importante influência nas propriedades reológicas do purê.

Segundo ACQUARONE *et alii* (1995), o suco de graviola (*Annona muricata*, L.) comporta-se como um fluido não-newtoniano, apresentando um ligeiro comportamento tixotrópico. Quanto aos seus parâmetros reológicos, o índice de consistência (**k**) aumenta com o aumento do conteúdo de sólidos solúveis e diminui com o aumento da temperatura enquanto que o índice de comportamento de fluxo (**n**) diminui com o aumento do conteúdo de sólidos solúveis e aumenta com o aumento da temperatura. Nesse mesmo trabalho foi observado que a altas concentrações, a temperatura exerce uma grande influência sobre o índice de consistência (**k**) e a baixas concentrações a temperatura exerce uma grande influência sobre o índice de comportamento de fluxo (**n**).

KHALIL *et alii* (1989) trabalhando com suco de banana (*Musa sp*) despectinizado, clarificado e filtrado usando um viscosímetro de cilindros coaxial, com concentrações entre 20 e 79,7°Brix e temperatura na faixa de 30 a 70°C, afirmam que o suco apresenta comportamento newtoniano em todas as concentrações. Os autores relatam que o efeito da temperatura na viscosidade, nas diferentes concentrações, pode ser descrito por uma relação do tipo de Arrhenius.

2.7 – Reometria de sucos e purês de frutas utilizando reômetros de cilindros concêntricos

Muitos pesquisadores trabalharam com reômetros de cilindros concêntricos para determinação das propriedades reológicas de produtos alimentícios. GEHRKE (1996) realizando um trabalho com sucos de frutas utilizou três reômetros de diferentes sistemas: placas paralelas, cilindros concêntricos tipo Searle e anular fixo com copo invertido (“double gap”). Na comparação entre os dois tipos de sistemas: cilindros concêntricos e placas paralelas, observou que os valores da viscosidade apresentaram diferenças, entretanto conclui que não se pode afirmar qual o valor mais correto.

OLIVEIRA & MENEGALLI (1998) realizando a caracterização reológica do suco de acerola (*Malpighia puniceifolia*) para as concentrações de 8; 15; 21 e 27 °Brix e temperaturas de 10; 30 e 50 °C, usando um reômetro de cilindros concêntricos verificaram que os dados foram melhor representados com o modelo de Ostwald-de Waele. Os valores de índice de consistência (**k**) encontrados variaram de 2,59 a 64,31 Pa.sⁿ e os valores de índice comportamento de fluxo (**n**) situaram-se na faixa de 0,18 a 0,29, apresentando assim um comportamento pseudoplástico.

IBARZ *et alii* (1995) pesquisando o comportamento reológico do suco de nêspera (*Eriobotrya japonica*) concentrado e clarificado em temperatura entre 5 e 65°C e uma concentração de 35 a 71°Brix, usando um viscosímetro de cilindros concêntricos, observaram que a viscosidade a uma temperatura constante aumentava linearmente com aumento da concentração, enquanto à concentração constante esta diminuía com o aumento da temperatura. Os resultados indicaram que o suco clarificado apresentou um comportamento newtoniano. Concluíram que o efeito da temperatura pode ser descrito pela equação de Arrhenius e o efeito dos sólidos solúveis pela Lei da Potência.

ALSINA *et alii* (1988) trabalhando com polpa de umbu (*Spondias tuberosa*, Arr. Câmara) num viscosímetro Brookfield, modelo RVT, afirmam que a polpa apresenta comportamento não-newtoniano, podendo ser representado pelo modelo da Lei da Potência.

BRANCO *et alii* (1995) estudando o comportamento do suco de laranja concentrado, utilizando um reômetro de cilindros concêntricos, tipo Searle, marca Rheotest 2.1, observaram que a temperatura apresenta uma grande influência sobre os parâmetros reológicos da tensão inicial dos modelos de Casson, Herschel-Bulkley e Mizrahi-Berk. Observaram ainda que para os parâmetros K_{OH} , τ_0 e K_{OM} quanto menor a temperatura maiores foram os valores destes parâmetros para as concentrações de 64,2; 60,0 e 55,0 °Brix. Também concluíram que a concentração de sólidos solúveis desempenha um papel importante no comportamento reológico desse tipo de suco, pois para cada temperatura os parâmetros decrescem com a redução da concentração.

ROJO *et alii* (1994) empregando um viscosímetro de cilindros concêntricos Haake RV-2, estudaram o comportamento do suco de uva em concentrações na faixa de 16 a 72 °Brix e temperaturas entre 5 e 50°C. Verificaram um comportamento newtoniano à concentrações abaixo de 70°Brix e pseudoplástico a concentrações de 70 a 72°Brix. Observaram ainda que estes sucos não apresentaram comportamento tixotrópico ou reopético e que a viscosidade decresce exponencialmente com o aumento da temperatura, para concentrações abaixo de 70°Brix. Os autores usaram os modelos da Lei da Potência, Bingham e Herschel-Bulkley para determinação dos parâmetros reológicos destes sucos.

2.8 - Influência da pectina

Pectina é um polissacarídeo complexo heterogêneo. Como a maioria de outros polissacarídeos de plantas, são ambos polidispersos e polinuclear, e sua composição varia com a fonte e os meios de extração. Em algumas amostras de pectina os parâmetros como o peso molecular ou a quantidade de subunidades específicas diferem de molécula para molécula (WHISTLER & BeMILLER, 1993).

Segundo Roehrig citado por QUEIROZ (1998), as substâncias pécticas estão presentes nas paredes celulares das plantas, onde funcionam como substâncias de ligação e revestimento nos espaços intercelulares. Roehrig afirma que estas são identificadas também, ao lado de polissacarídeos algáceos e algumas hemiceluloses solúveis, como fibra alimentar solúvel (FAS).

Segundo IBARZ *et alii* (1992) o suco e a polpa de pêsego livre de pectina apresentam comportamento de fluido newtoniano.

O suco de caqui despectinizado apresenta um comportamento newtoniano, enquanto o suco natural pode ser melhor descrito usando a equação de Herschel-Bulkley e o efeito da temperatura (4-60°C) pode ser descrito usando uma equação do modelo de Arrhenius. O efeito dos sólidos solúveis (21,5-67 °Brix) pode ser analisado usando as equações da potência e exponencial (IBARZ *et alii*, 1993).

IBARZ *et alii* (1994), estudando o comportamento reológico do suco de laranja clarificado e despectinizado usando um viscosímetro de cilíndricos concêntricos, observaram que o mesmo comporta-se como fluido newtoniano. Segundo estes mesmos autores o efeito da temperatura (5-70 °C) pode ser descrito usando a equação de Arrhenius, enquanto que o efeito da concentração (30,7-63,5 °Brix) pode ser descrito pelos modelos da potência e exponencial.

SARAVACOS (1970), afirma que o suco de maçã despectinizado comporta-se como fluido newtoniano para todas as concentrações (10-80 °Brix) na faixa de temperatura de 20 °C a 70 °C e que, sucos turvos, contendo uma significativa quantidade de partículas suspensas e coloidais apresentam-se mais viscosos que os sucos despectinizados. Neste caso, o suco comporta-se como newtoniano abaixo de 50 °Brix e para concentrações maiores, comporta-se como fluido pseudoplástico

QUEIROZ (1998), estudando sucos de abacaxi e manga despectinizados, divididos em quatro frações separadas por peneiras, observou que todos apresentam o comportamento pseudoplástico.

WHITTENBERGER & NUTTING (1957), estudando suco de tomate observaram que embora as estruturas insolúveis possam ser necessárias para a obtenção de um grau aceitável de consistência, suas propriedades e comportamento são modificados significativamente pela presença de substâncias pécticas.

Segundo FODA & McCOLLUM (1970), as pectinas são geralmente suspeitas da maior contribuição da consistência do suco de tomate, e que a inativação rápida de enzimas pécticas é essencial para impedir que a viscosidade abaixe.

SREENATH *et alii*, (1987) estudando várias enzimas usadas para reduzir a viscosidade da polpa de manga, relatam que com a enzima Ultrazym 100 conseguiram reduzir a viscosidade em 82 %, quando usada a uma concentração de 0,05% (p/v) por 30 minutos e temperatura de 40^oC.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Paraíba – Campus II.

3.1 - Aquisição e processamento do material

Trabalhou-se com polpa de goiaba e para este fim utilizou-se goiabas da variedade “Paloma”. Estas frutas foram adquiridas no comércio local. Foram escolhidas as goiabas de melhor aspecto, dando preferência aos exemplares mais firmes, sem danos aparentes na casca e em estágio de maturação semelhante em todo o lote. Foi feita uma lavagem com água corrente para uma pré-limpeza e em seguida uma desinfecção colocando as frutas em uma solução de Hipoclorito de Sódio à 30ppm. Realizou-se nova lavagem em água corrente e depois as frutas foram processadas em uma despoldadeira da marca Laboremus com tela de 1mm existente no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, para obtenção da polpa. Esta polpa foi embalada e colocada em freezer para conservação. A Figura 05 representa um fluxograma das etapas experimentais deste estudo.

3.2 - Caracterização da polpa

3.2.1 - pH

A determinação de pH foi realizada através do método potenciométrico, com um pHmetro da marca Analyser, modelo 300M. Esta metodologia baseia-se na determinação da concentração hidrogenionica (pH) através de leitura direta em potenciômetro, como descrito no item nº 4.7.2 em PREGNOLATTO & PREGNOLATTO (1985).

3.2.2-Brix

Esta análise foi realizada através de leitura refratométrica. A metodologia baseia-se no fato de que os índices de refração de soluções aquosas de sacarose podem ser correlacionadas com seu teor de sacarose. Tem-se assim, uma correspondência entre os índices de refração e percentagem de sacarose, a qual dá-se o nome de grau Brix.

3.2.3 - Pectinas

A determinação foi feita segundo metodologia proposta por RANGANNA (1978), cujo o princípio é a neutralização das cargas dos resíduos de ácidos urônicos livres pelos íons de cálcio, provocando a gelificação da pectina e sua precipitação. Os resultados são expressos em percentagem de pectato de cálcio (p/p).

3.2.4 - Tipos de material utilizados

A polpa de goiaba foi dividida em "natural" e "despectinizada". O material "natural" não recebeu qualquer tratamento enzimático, enquanto o "despectinizado" foi tratado com a enzima pectinolítica de nome comercial pectizyn fabricado pela empresa Prozyn.

3.2.5 - Preparação do material "natural"

O material denominado "natural" não sofreu nenhum tratamento antes de ser submetido às medidas reológicas, apenas o material foi descongelado e homogeneizado.

3.2.6 - Preparação do material "despectinizado"

A preparação das amostras do material denominado "despectinizado" para as medidas reológicas, inicialmente seguiu a mesma metodologia adotada para o material "natural". Em seguida adicionou-se a enzima na amostra a 25⁰C, e deixou-se em repouso por 1 hora, para então serem feitas as medidas reológicas.

3.3 - Medição das propriedades reológicas

As leituras foram efetuadas com um viscosímetro Brookfield-RTV, com spindle nº6, fabricado por Brookfield Engineering Laboratories, Inc., E.U.A, às temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70⁰C e pressão ambiente.

Para realização do experimento foi utilizado um aparato que constou de uma cuba de vidro onde foi colocado um aquecedor com bomba de circulação, 1 béquer e o viscosímetro (Figura 07). Em cada ensaio utilizou-se cerca de 400g de amostra, a qual foi colocada em um béquer de 600ml. Os experimentos foram feitos em triplicata e a mesma amostra foi utilizada para a leitura em todas as temperaturas. Quando a amostra atingia 30°C iniciavam-se as leituras, efetuadas após transcorrido um tempo de 30s em cada velocidade (2.5, 5, 10, 20, 50, 100 rpm). Após decorrido os 30s o viscosímetro era desligado e procedia-se a leitura do torque. Em seguida era feita a mudança de velocidade para a rotação imediatamente superior e repetia-se a operação. Este procedimento foi seguido para todas as amostras. Foram feitas apenas leituras ascendentes. Procedimento que não afetou os resultados devido ao fato que durante os ensaios preliminares observou-se que as leituras ascendentes e descendentes não apresentavam diferenças significativas.

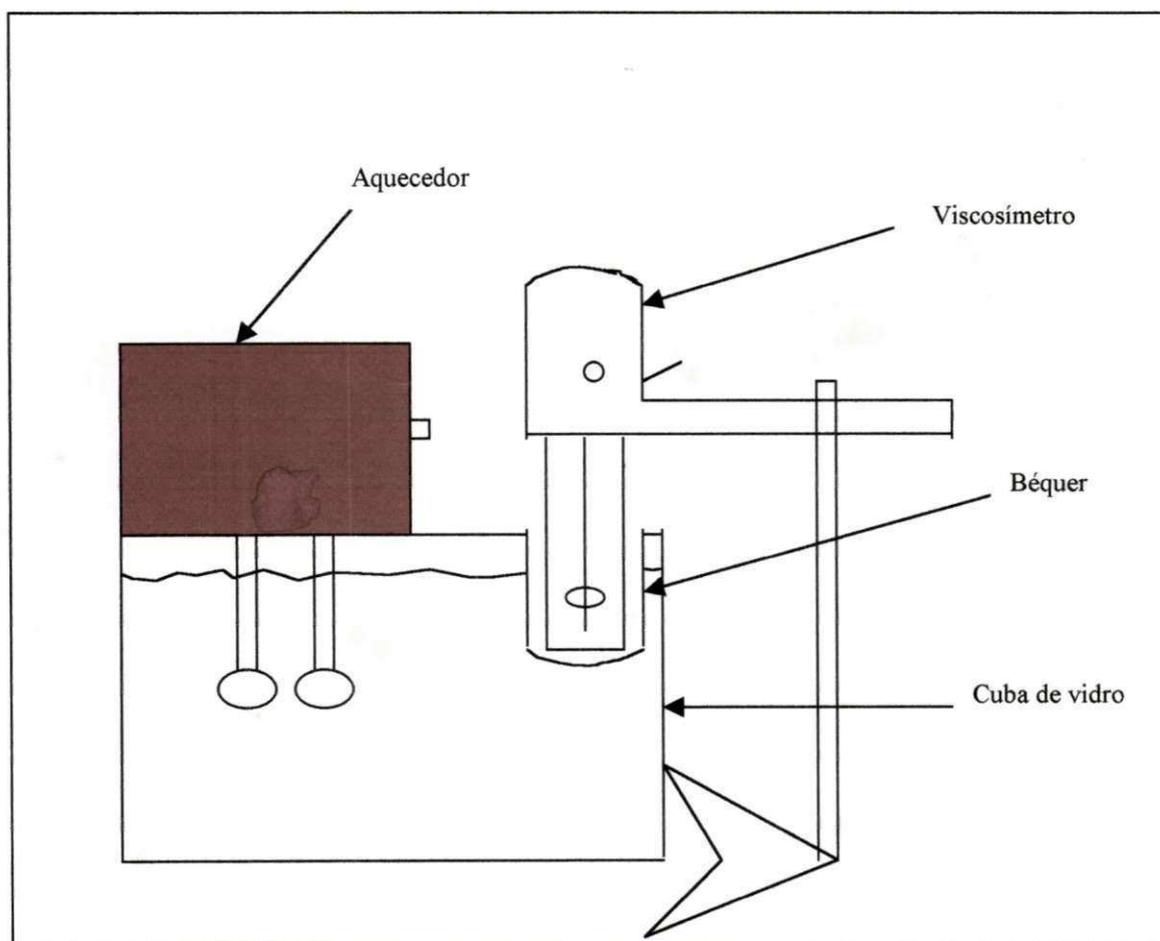


Figura 06 – Esquema do aparato utilizado para realização dos experimentos

3.4 – Tratamento dos dados experimentais

3.4.1 – Conversão dos dados experimentais

As leituras do viscosímetro foram transformadas em funções reológicas através dos fatores de conversão seguindo a metodologia de MITSCHKA (1982). Para a obtenção da tensão de cisalhamento, índice de fluxo e taxa de deformação conforme se segue.

3.4.1.1 – Tensão de cisalhamento

As tensões de cisalhamento, em Pa, foram obtidas multiplicando-se os valores da leitura do torque (α_1) pelo fator k_{at} (Tabela 02) correspondente ao spindle utilizado.

$$\tau_1 = k_{at} \alpha_1 \quad \rightarrow \quad Pa \quad (3.1)$$

Tabela 02 – Fatores de conversão para os spindles do viscosímetro Brookfield RVT

| Número do spindle | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
|-------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| k_{at} | 0.035 | 0.119 | 0.279 | 0.539 | 1.05 | 2.35 | 8.4 | |
| k_{ny} | n = 0.1 | 1.728 | 1.431 | 1.457 | 1.492 | 1.544 | 1.366 | 1.936 |
| | 0.2 | 0.967 | 0.875 | 0.882 | 0.892 | 0.907 | 0.851 | 1.007 |
| | 0.3 | 0.705 | 0.656 | 0.656 | 0.658 | 0.663 | 0.629 | 0.681 |
| | 0.4 | 0.576 | 0.535 | 0.530 | 0.529 | 0.528 | 0.503 | 0.515 |
| | 0.5 | 0.499 | 0.458 | 0.449 | 0.445 | 0.442 | 0.421 | 0.413 |
| | 0.6 | 0.449 | 0.404 | 0.392 | 0.387 | 0.382 | 0.363 | 0.346 |
| | 0.7 | 0.414 | 0.365 | 0.350 | 0.343 | 0.338 | 0.320 | 0.297 |
| | 0.8 | 0.387 | 0.334 | 0.317 | 0.310 | 0.304 | 0.286 | 0.261 |
| | 0.9 | 0.367 | 0.310 | 0.291 | 0.283 | 0.276 | 0.260 | 0.232 |
| | 1.0 | 0.351 | 0.291 | 0.270 | 0.262 | 0.254 | 0.238 | 0.209 |

Fonte: Mitschka (1982)

3.4.1.2 – Índice de comportamento de fluxo

Os valores de tensão de cisalhamento (τ_1) e da velocidade de rotação (N_1) foram plotados na forma log-log. Fez-se uma regressão linear do tipo $y = ax + b$, onde o coeficiente angular da reta corresponde ao fator (n) da Tabela 02.

tensão
coef. ang
coef. linear
velocidade de rotação

3.4.1.3 – Taxa de deformação

O valor da taxa de deformação ($\dot{\gamma}$), em s^{-1} , foi calculado multiplicando-se a velocidade de rotação (N_1) pelo fator K_{ny} (Tabela 02), que está em função do índice de comportamento de fluxo e do spindle utilizado:

$$\dot{\gamma} = K_{ny}(n)N_1 \quad (3.2)$$

3.4.1.4 – Viscosidade aparente

A viscosidade aparente, em Pa.s, foi obtida através da divisão da equação que fornece o valor da tensão de cisalhamento pela equação que fornece a taxa de deformação, ou seja:

$$\eta_a = \frac{\tau_1}{\dot{\gamma}} \quad (3.3)$$

3.4.2 – Análise matemática

Os dados experimentais foram analisados, através de ajustes feitos com os modelos de Ostwald-de-Waele (Equação 2.2) , Casson (Equação 2.4) e Herschel-Bulkley (Equação 2.5) Estes modelos foram escolhidos devido ao fato de serem comumente utilizados em trabalhos abordando a reologia de frutas (ANTONIETTO *et alii*, 1998, OLIVEIRA & MENEGALLI, 1998 e BEZERRA, 1997). Com exceção do modelo de Ostwald-de-Waele nos demais modelos encontra-se o termo de tensão inicial, que é uma característica importante em aplicações tecnológicas para fluidos alimentícios.

Os parâmetros de cada modelo foram determinados utilizando-se o Software **ORIGIN versão 5.0**. Para a escolha do melhor modelo foram analisados os valores de R^2 (porcentagem de variação total explicada) definido como a razão entre a soma quadrática da regressão pela soma quadrática total, e pelo teste do Qui-quadrado (X^2) que expressa a diferença entre os valores previstos pelo modelo e os valores obtidos experimentalmente. Assim, o modelo mais adequado, é aquele com altos valores de R^2 e baixos valores de X^2 .

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Caracterização do material

Os resultados de pH, °Brix e pectina total determinados na polpa de goiaba “in natura” estão na Tabela 03. Estes valores podem ser comparados aos obtidos por MAIA *et alii* (1998) apresentados na Tabela 01.

Tabela 03 – Características físico-químicas da polpa de goiaba.

| Parâmetros | Valores |
|-------------|---------|
| PH | 3,89 |
| °Brix | 12,2 |
| Pectina (%) | 0,82 |

4.2 – Reometria

Na Tabela 04 encontram-se as temperaturas e concentrações de enzima utilizadas para obtenção dos dados reológicos. Em algumas concentrações não foi possível a leitura em todas as temperaturas, uma vez que devido ao aumento da temperatura, a consistência da polpa diminuía tanto que não era possível realizar a leitura com o viscosímetro utilizado.

Tabela 04 – Concentrações e temperaturas usadas para a construção dos reogramas

| Concentrações (% de enzima) | Temperatura (°C) |
|-----------------------------|------------------|
| “in natura” | 30 |
| | 40 |
| | 50 |
| | 60 |
| | 70 |
| 0,001 | 30 |
| | 40 |
| | 50 |
| | 60 |
| 0,0013 | 30 |
| | 40 |
| | 50 |
| | 60 |
| | 70 |
| 0,0018 | 30 |
| | 40 |
| | 50 |
| | 60 |

Nas Figuras 07 a 10 apresentam-se os resultados dos reogramas obtidos experimentalmente para as polpas de goiaba “in natura” e despectinizadas.

Na polpa “in natura” (Figura 07) pode-se observar que as curvas ficaram bem próximas, não sendo possível observar uma influência da temperatura no comportamento reológico desta amostra.

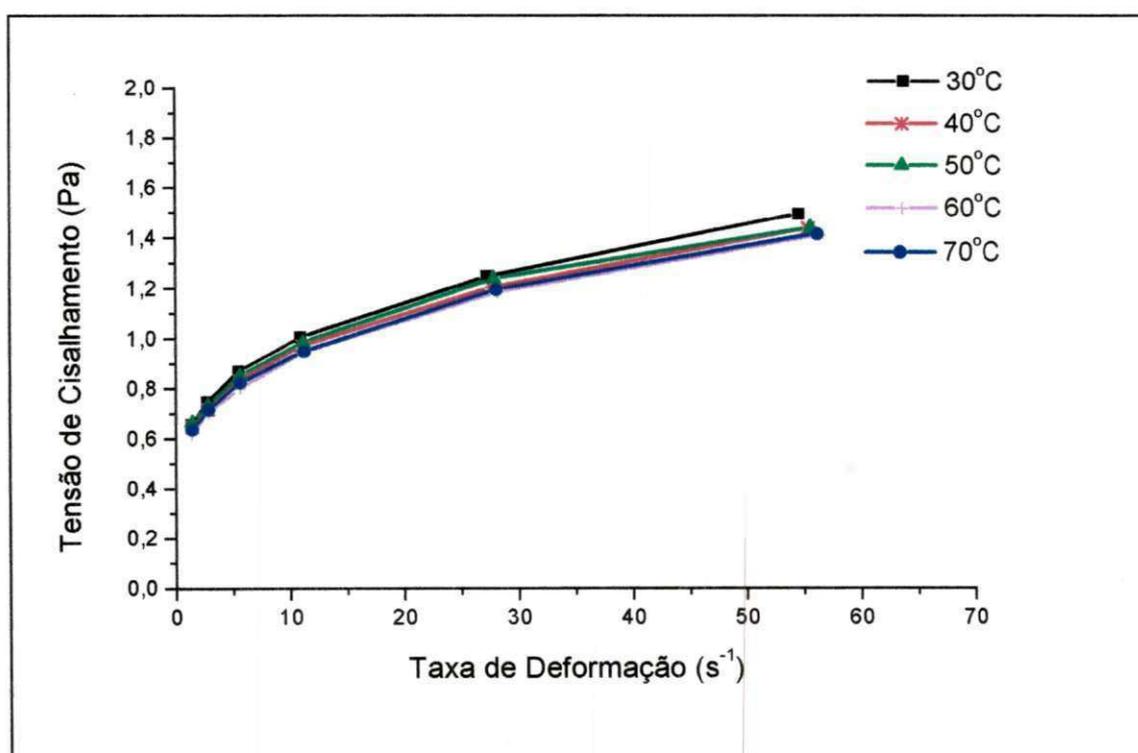


Figura 07 – Reograma confeccionado a partir das médias das leituras obtidas com polpa de goiaba “in natura” para temperaturas de 30 a 70°C.

Nos reogramas das polpas despectinizadas (Figuras 08 a 10) observou-se que as curvas apresentaram comportamentos distintos, verificando-se nestes casos que a temperatura influenciou no comportamento das amostras.

Na Figura 08 observa-se que os pontos iniciais das curvas estão dispersos na faixa de tensão de cisalhamento 0,3 a 0,6 Pa e os últimos pontos obtidos dispersos entre 0,8 e 1,4 (Tabela C.1, Apêndice C).

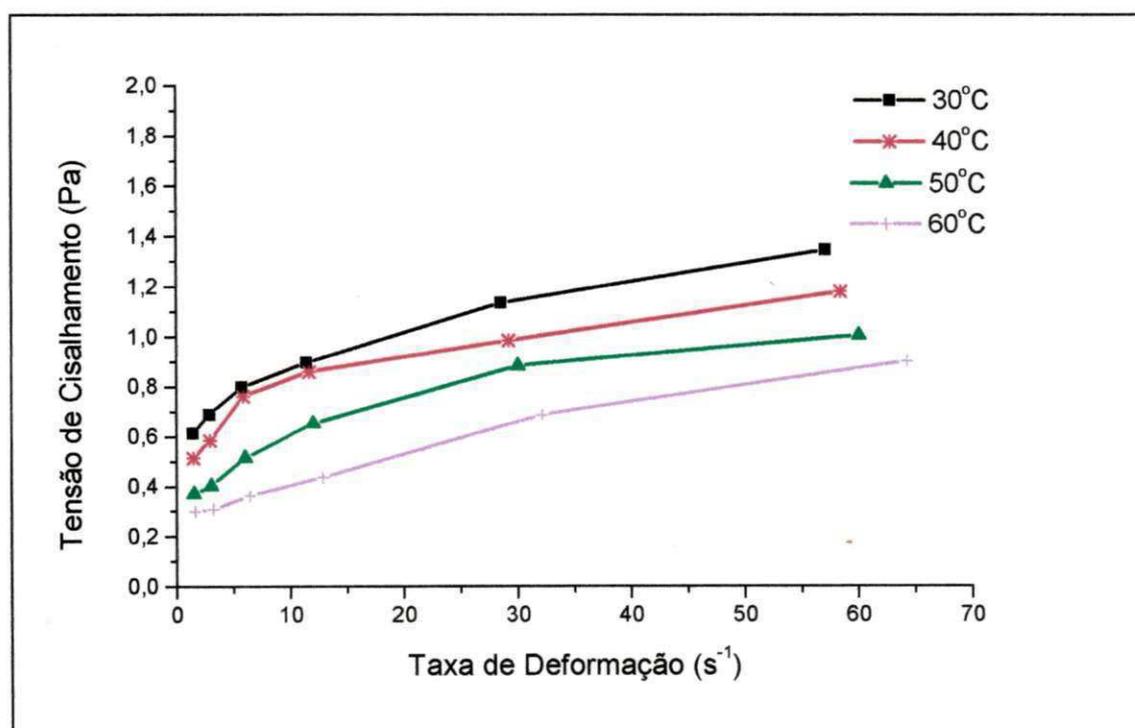


Figura 08 – Reograma confeccionado a partir das médias das leituras obtidas com polpa de goiaba com concentração 0,001% para temperaturas de 30 a 60°C.

Na Figura 09 observa-se que nas temperaturas entre 40 e 70°C, os 2 primeiros pontos obtidos ficaram próximos para todas as amostras, afastando-se a partir de uma taxa de deformação em torno de 7 s⁻¹. Entretanto nas temperaturas de 60 e 70°C a distância entre essas curvas foram menores em relação as demais.

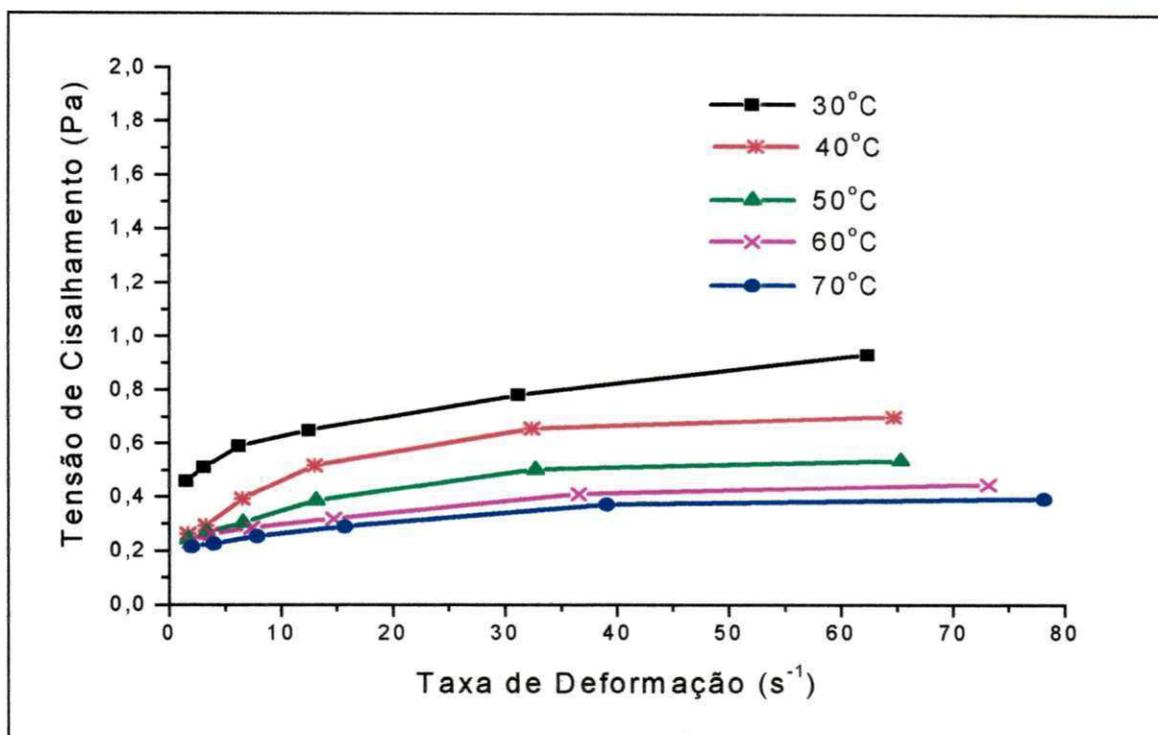


Figura 09 – Reograma confeccionado a partir das médias das leituras obtidas com polpa de goiaba com concentração 0,0013% para temperaturas de 30 a 70°C.

Na polpa de concentração 0,0018% de enzima (Figura 10), observa-se que, assim como nas amostras da Figura 09, os pontos iniciais tendem a se aproximar para as temperaturas entre 40 e 60°C, porém neste caso, nas temperaturas de 50 e 60°C os três primeiros pontos coincidiram e posteriormente foram se afastando.

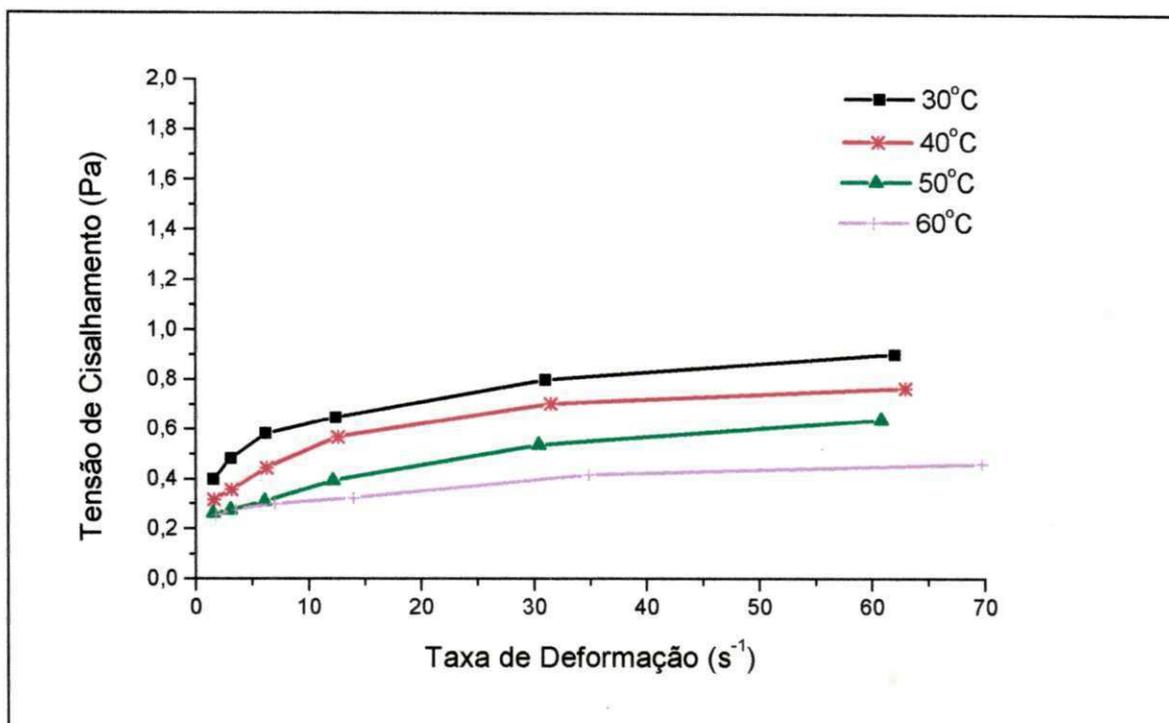


Figura 10 – Reograma confeccionado a partir das médias das leituras obtidas com polpa de goiaba com concentração 0,0018% para temperaturas de 30 a 60°C.

4.2.1 – Modelo de Ostwald-de-Waele

Os parâmetros de ajuste pelo modelo de Ostwald-de-Waele, encontram-se na Tabela 05.

Tabela 05 – Resultados dos parâmetros de ajuste para o modelo de Ostwald-de-Waele para os materiais estudados.

| Amostra | T (°C) | k (Pa.s ⁿ) | n | Er (k) | Er (n) | X ² | R ² |
|-------------|--------|------------------------|---------|---------|---------|----------------|----------------|
| “in natura” | 30 | 0,59385 | 0,22815 | 0,01066 | 0,00588 | 0,00031 | 0,99755 |
| | 40 | 0,57619 | 0,2254 | 0,01282 | 0,00727 | 0,00044 | 0,99614 |
| | 50 | 0,59362 | 0,21982 | 0,01185 | 0,00654 | 0,00037 | 0,99671 |
| | 60 | 0,55121 | 0,23113 | 0,01206 | 0,00708 | 0,00039 | 0,99654 |
| | 70 | 0,56726 | 0,22495 | 0,01236 | 0,00709 | 0,00041 | 0,99632 |
| 0,001% | 30 | 0,54509 | 0,22042 | 0,01458 | 0,00868 | 0,00056 | 0,99422 |
| | 40 | 0,49137 | 0,21541 | 0,02168 | 0,01428 | 0,00123 | 0,98419 |
| | 50 | 0,31517 | 0,28955 | 0,01701 | 0,01651 | 0,00093 | 0,98896 |
| | 60 | 0,19807 | 0,35924 | 0,02323 | 0,03389 | 0,00218 | 0,97074 |
| 0,0013% | 30 | 0,40712 | 0,19527 | 0,01171 | 0,00926 | 0,00033 | 0,99149 |
| | 40 | 0,26063 | 0,27236 | 0,02414 | 0,02853 | 0,00178 | 0,96416 |
| | 50 | 0,22567 | 0,23667 | 0,01408 | 0,01962 | 0,00054 | 0,9758 |
| | 60 | 0,2186 | 0,18854 | 0,00879 | 0,01266 | 0,00018 | 0,98305 |
| | 70 | 0,19458 | 0,18499 | 0,00977 | 0,01555 | 0,00022 | 0,97372 |
| 0,0018% | 30 | 0,37989 | 0,21297 | 0,00974 | 0,00816 | 0,00024 | 0,99464 |
| | 40 | 0,28867 | 0,24580 | 0,01767 | 0,01898 | 0,00088 | 0,97944 |
| | 50 | 0,20422 | 0,27723 | 0,0133 | 0,02000 | 0,00055 | 0,98162 |
| | 60 | 0,22113 | 0,17312 | 0,01031 | 0,01479 | 0,00024 | 0,97234 |

Analisando os valores da Tabela 05, verifica-se que o parâmetro k (índice de consistência) das diversas amostras, a mesma temperatura decresce com o aumento da concentração de enzima, com exceção da concentração de 0,0018 % à temperatura de 40°C. À concentração de enzima constante esse parâmetro diminui com o aumento da temperatura, entretanto, na polpa “in natura” esta tendência não se manifesta de forma indiscutível. Na concentração de 0,0018% de enzima apesar do declínio dos valores k observados desde as temperaturas iniciais, não se observou diferença para os dados obtidos entre 50 e 60°C. Os valores deste parâmetro para a polpa “in natura” ficaram na faixa de 0,59385 e 0,55121. Estes valores estão próximos ao determinado por RAO & PALOMINO (1974) que foi de 0,4863, onde os autores estudaram o comportamento de fluxo de purê de goiaba a uma concentração de 10,3 °Brix, sendo também utilizado o modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência). Neste trabalho os autores observaram uma diferença nos valores do parâmetro k quando comparado com outros trabalhos, fato esse justificado como devido as diferentes origens geográficas das frutas.

Os valores do parâmetro n (índice de comportamento de fluxo) apresentaram oscilações, sem uma tendência definida em relação a concentração e a temperatura. Ficando os valores deste parâmetro na faixa de 0,35924 e 0,17312. ADORNO (1997) estudando o comportamento reológico do suco de goiaba verificou também uma oscilação neste parâmetro tanto à temperatura constante quanto à concentração de sólidos solúveis constantes.

Na análise dos resultados estatísticos para o modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), verificou-se que os erros de k e n foram baixos para todas as amostras. Quanto ao qui-quadrado (X^2) os valores foram bons, ficando próximos de zero para todas as amostras. Os valores de R^2 para a polpa “in natura” ficaram na faixa de 0,99, mostrando que este modelo representa um bom ajuste para este caso. Porém, nas polpas despectinizadas estes valores situaram-se acima de 0,96.

De acordo com o parâmetro n determinado pelo modelo de Ostwald-de-Waele, que **tem** valores menores do que 1 (um), pode-se afirmar que a polpa em estudo apresenta comportamento pseudoplástico para todas as amostras.

4.2.2 – Modelo de Casson

Os parâmetros do ajuste obtidos pelo modelo de Casson encontram-se na Tabela 06.

Tabela 06 – Resultados dos parâmetros ajustados para o modelo de Casson para os materiais estudados.

| Conc. | T (°C) | $k_{oc} (Pa)^{0,5}$ | $k_c (Pa.s)^{0,5}$ | Er (k_o) | Er (k_c) | X^2 | R^2 |
|-------------|--------|---------------------|--------------------|--------------|--------------|---------|---------|
| “in natura” | 30 | 0,76415 | 0,06492 | 0,01897 | 0,00459 | 0,00060 | 0,98037 |
| | 40 | 0,75457 | 0,06256 | 0,01698 | 0,00408 | 0,00048 | 0,98325 |
| | 50 | 0,76638 | 0,06151 | 0,01916 | 0,00460 | 0,00061 | 0,97815 |
| | 60 | 0,73893 | 0,06273 | 0,01731 | 0,00412 | 0,00050 | 0,98301 |
| | 70 | 0,74990 | 0,06158 | 0,01704 | 0,00407 | 0,00048 | 0,98285 |
| 0,001 | 30 | 0,73711 | 0,05841 | 0,01546 | 0,00366 | 0,00040 | 0,98454 |
| | 40 | 0,69840 | 0,05404 | 0,03296 | 0,00771 | 0,00180 | 0,92466 |
| | 50 | 0,55383 | 0,06308 | 0,02985 | 0,00689 | 0,00148 | 0,95443 |
| | 60 | 0,45180 | 0,06305 | 0,01324 | 0,00295 | 0,00030 | 0,99130 |
| 0,0013 | 30 | 0,64398 | 0,04195 | 0,01207 | 0,00273 | 0,00024 | 0,98332 |
| | 40 | 0,50082 | 0,05360 | 0,03967 | 0,00911 | 0,00261 | 0,89645 |
| | 50 | 0,47509 | 0,04042 | 0,02297 | 0,00525 | 0,00088 | 0,9368 |
| | 60 | 0,47608 | 0,02835 | 0,01177 | 0,00254 | 0,00023 | 0,96885 |
| | 70 | 0,45182 | 0,02543 | 0,01339 | 0,0028 | 0,00030 | 0,95382 |
| 0,0018 | 30 | 0,61851 | 0,04571 | 0,0263 | 0,00598 | 0,00115 | 0,93602 |
| | 40 | 0,53586 | 0,04801 | 0,03208 | 0,00723 | 0,00171 | 0,91682 |
| | 50 | 0,45291 | 0,04667 | 0,01331 | 0,00305 | 0,00030 | 0,98315 |
| | 60 | 0,47949 | 0,02550 | 0,00868 | 0,00186 | 0,00012 | 0,97916 |

Os valores da viscosidade de Casson (k_c) apresentam uma tendência a diminuir com a adição da enzima à temperatura constante. Observando o aumento da temperatura em cada amostra verificou-se que também há um decréscimo nos valores do parâmetro k_c com algumas oscilações, onde a maior variação foi o de concentração 0,001% com uma diferença de cerca de 39% entre os valores maiores e menores, enquanto que o material “in natura” apresentou a menor variação (cerca de 4%). Quanto ao parâmetro k_{oc} houve um decréscimo com o aumento da concentração e da temperatura.

De acordo com os parâmetros estatísticos, verificou-se que os erros dos parâmetros k_o e k_{oc} foram baixos para todas as amostras. Os valores de X^2 apresentam valores próximos de zero, enquanto os valores de R^2 oscilaram, sendo os melhores valores o da polpa “in natura”, ficando entre 0,98325 a 0,97815. Os menores valores de R^2 foram da concentração 0,0013% ficando entre 0,98332 a 0,89645.

4.2.3 – Modelo de Herschel-Bulkley

O ajuste do modelo de Herschel-Bulkley, encontra-se na Tabela 07. Comparando os parâmetros X^2 e R^2 , com aqueles dos modelos de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência) e Casson, observa-se que o modelo de Herschel-Bulkley representou o melhor ajuste aos dados experimentais.

Tabela 07 – Resultados dos parâmetros ajustados para o modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de goiaba

| Amostra | T °C | τ_{OH} (Pa) | K_H (Pa.s ⁿ) | n_H | Er (τ_{OH}) | Er (k_H) | Er (n_H) | X^2 | R^2 |
|-------------|------|------------------|-------------------------------|---------|--------------------|--------------|--------------|----------|---------|
| “in natura” | 30 | 0,29773 | 0,32645 | 0,32478 | 0,02494 | 0,02139 | 0,01157 | 0,000016 | 0,99995 |
| | 40 | 0,33337 | 0,27852 | 0,34414 | 0,03434 | 0,02885 | 0,01874 | 0,000039 | 0,99987 |
| | 50 | 0,28131 | 0,33924 | 0,30765 | 0,09238 | 0,08025 | 0,04055 | 0,000186 | 0,99938 |
| | 60 | 0,30814 | 0,27746 | 0,34353 | 0,03231 | 0,02708 | 0,01759 | 0,000035 | 0,99989 |
| | 70 | 0,32248 | 0,27937 | 0,3399 | 0,03710 | 0,03123 | 0,02006 | 0,000044 | 0,99985 |
| 0,001% | 30 | 0,35018 | 0,23393 | 0,35885 | 0,0571 | 0,04702 | 0,03685 | 0,000127 | 0,99902 |
| | 40 | -0,98756 | 1,4444 | 0,09816 | 2,25185 | 2,21625 | 0,12210 | 0,001270 | 0,98769 |
| | 50 | -0,11532 | 0,41744 | 0,24572 | 0,35734 | 0,32388 | 0,11621 | 0,001180 | 0,98952 |
| | 60 | 0,22613 | 0,04187 | 0,67283 | 0,04312 | 0,02152 | 0,11218 | 0,000650 | 0,99341 |
| 0,0013% | 30 | 0,29068 | 0,14716 | 0,35431 | 0,05887 | 0,04795 | 0,05845 | 0,000129 | 0,99753 |
| | 40 | -2,44196 | 2,64476 | 0,04795 | 9,57841 | 9,53978 | 0,15542 | 0,001330 | 0,97994 |
| | 50 | -0,10684 | 0,32455 | 0,18727 | 0,46828 | 0,44129 | 0,17257 | 0,000704 | 0,97655 |
| | 60 | 0,12997 | 0,1013 | 0,30022 | 0,09821 | 0,08348 | 0,13471 | 0,000192 | 0,98651 |
| | 70 | 0,09262 | 0,1104 | 0,26279 | 0,15034 | 0,13152 | 0,18008 | 0,000270 | 0,97556 |
| 0,0018% | 30 | -0,64537 | 0,99964 | 0,10631 | 0,63937 | 0,62675 | 0,05288 | 0,000141 | 0,99767 |
| | 40 | -1,10934 | 1,35783 | 0,0804 | 2,47806 | 2,44918 | 0,12131 | 0,000698 | 0,98778 |
| | 50 | 0,15511 | 0,07679 | 0,45378 | 0,06571 | 0,04771 | 0,12336 | 0,000398 | 0,99000 |
| | 60 | 0,19028 | 0,05229 | 0,39578 | 0,05414 | 0,04108 | 0,14450 | 0,000493 | 0,98560 |

Observando os valores da Tabela 07, verifica-se que a tensão inicial τ_{OH} não apresentam tendências definidas em função da temperatura para todas as amostras. Observa-se ainda, valores pequenos para os erros os quais foram baixos, com exceção da concentração de 0,0013% à temperatura de 40°C que apresenta um valor mais elevado.

Os valores do índice de consistência (k_H) à temperatura constante de modo geral decresceram com o aumento da concentração de enzima, com exceção da temperatura de 40°C. Para a polpa “in natura”, verificou-se que os valores de k_H sofreram pequenas oscilações com o aumento da temperatura, situando-se na faixa de 0,27746 a 0,33924. Estes valores são próximos aos determinados por ADORNO (1997) para o suco de goiaba com 15 °Brix e na faixa numa faixa respectivamente de 30 a 70°C, onde os valores determinados foi de 0,46 a 0,10. Quanto as amostras despectinizadas, o índice de consistência (k_H) sofreu grandes oscilações com o aumento da temperatura.

Os valores de n_H apresentados na Tabela 07 situaram-se, em todos os casos, abaixo de 1 (um), indicando que o fluido tem comportamento pseudoplástico.

Os valores do índice de comportamento de fluxo (n_H) não decrescem com o aumento da concentração de enzima à temperatura constante, enquanto para mesmas concentrações de enzima este parâmetro sofreu grande variação entre os maiores e menores valores (acima de 80%) com a temperatura. Estas oscilações foram menores (aproximadamente 11% entre o maior e menor valor) na polpa “in natura”. Os valores do índice de fluxo (n_H) da polpa “in natura” ficaram na faixa de 0,30765 a 0,34414, sendo próximos aos valores obtidos por Garcia *et alii* citado por ADORNO (1997) que foi de 0,4863, onde os autores utilizaram um viscosímetro Brookfield LVF para determinação dos parâmetros reológicos da polpa de goiaba a uma concentração de 14,8 °Brix e temperatura de 23,4°C.

Quanto aos parâmetros estatísticos, os erros em relação aos parâmetros τ_{OH} , k_H e n_H determinados pelo ajuste do modelo de Herschel-Bulkley aos dados experimentais mostraram variações distintas. Os valores do erro da tensão inicial (τ_{OH}) foram de modo geral baixos para todas as amostras, com exceção da temperatura de 40°C para as amostras com enzima, visto que estas apresentaram valores superiores, fato esse que se

repetiu para os erros dos outros parâmetros. Com relação ao índice de consistência (k_H), os erros foram em geral baixos. O índice de comportamento de fluxo (n) apresentou erros menores na polpa “in natura”.

Os valores do Qui-quadrado (X^2) foram próximos a zero para todas as amostras e os valores de R^2 ficaram próximos a 1 (um), sendo que para a polpa “in natura” observaram-se os melhores valores.

Comparando-se os parâmetros reológicos determinados pelos três modelos utilizados, observa-se que o índice de consistência (k), determinado pelo modelo de Ostwald-de-Waele à concentração de enzima constante, decresce com o aumento da temperatura como pode ser visto na Figura 11, enquanto o índice de consistência (k_H) do modelo de Herschel-Bulkley na polpa “in natura” (Figura 12) apresentou pequenas variações e uma tendência linear. Porém, nas polpas despectinizadas não foi possível observar uma tendência bem definida para este parâmetro.

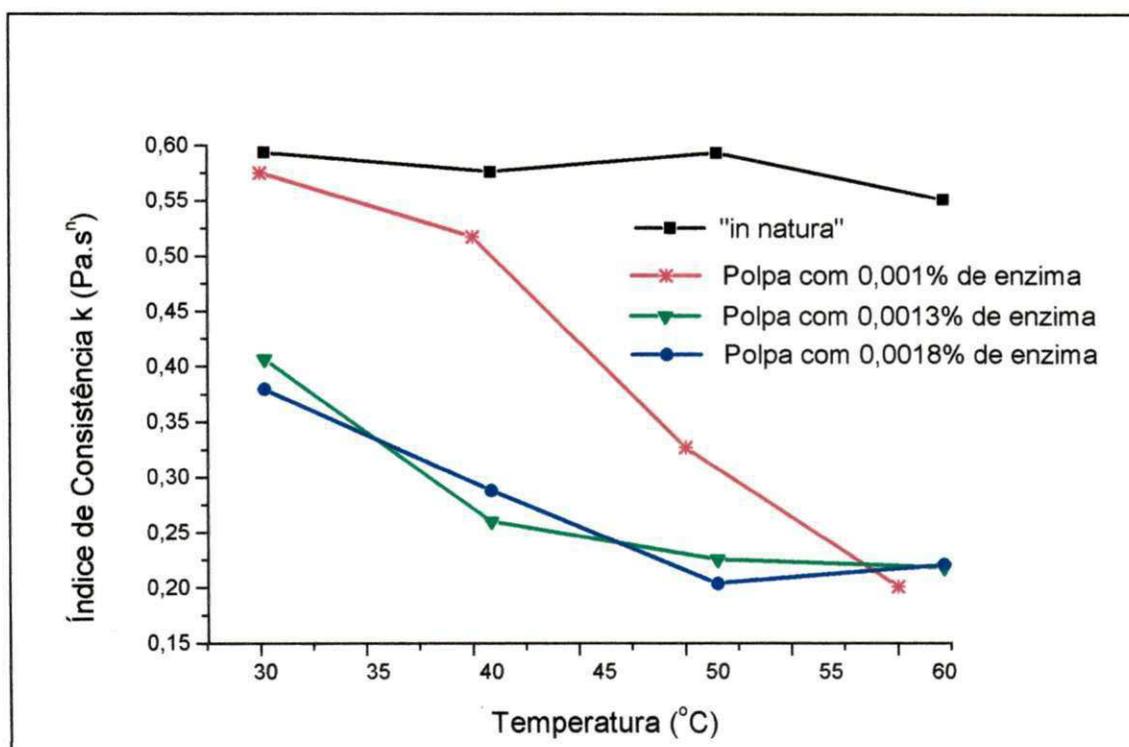


Figura 11 – Polpa de goiaba – Índice de consistência em função da temperatura – Ajuste pelo modelo de Ostwald-de-Waele.

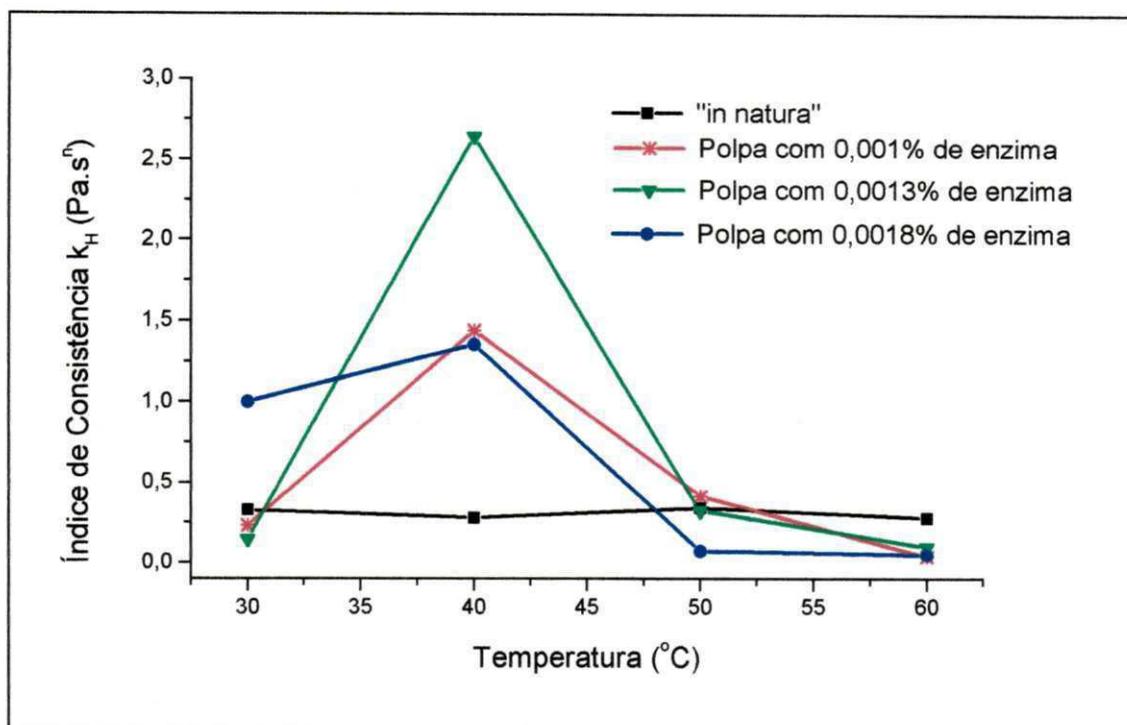


Figura 12 – Polpa de goiaba - Índice de consistência em função da temperatura – Ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley.

Quanto a tensão inicial (K_{oc}) determinada pelo modelo de Casson, verifica-se um decréscimo com o aumento da temperatura à concentração constante de enzima (Figura 13), isto não é verificado no modelo de Herschel-Bulkley (Figura 14). Na polpa “in natura” a tendência é linear ou apresenta uma tendência de decréscimo pouco perceptível. Analisando os resultados obtidos por GEHRKE (1996) pode-se verificar que para o suco de laranja com concentração 35 °Brix, os valores das tensões iniciais determinadas pelos modelos de Herschel-Bulkley e Casson também não seguiram a mesma tendência na faixa de temperatura de 50 a 80°C, enquanto que para o suco de laranja de concentração 45°Brix na mesma faixa de temperatura foi observado a mesma tendência neste parâmetro para os dois modelos.

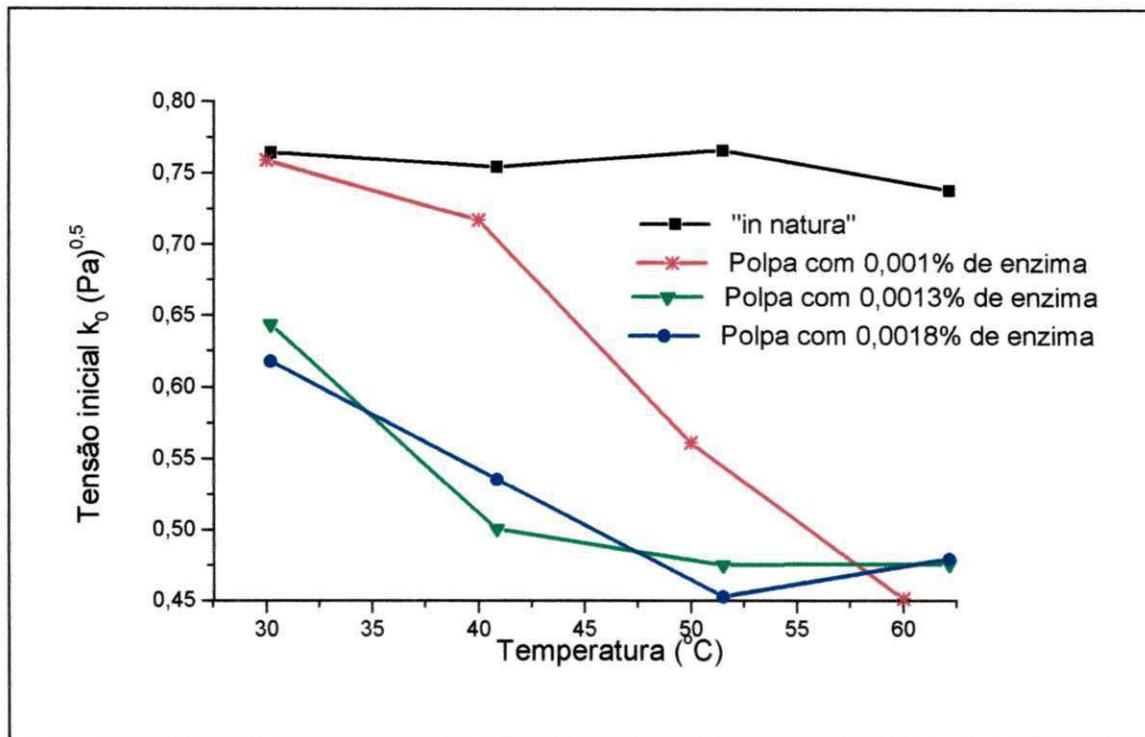


Figura 13 – Polpa de goiaba – Tensão inicial em função da temperatura – Ajuste pelo modelo de Casson.

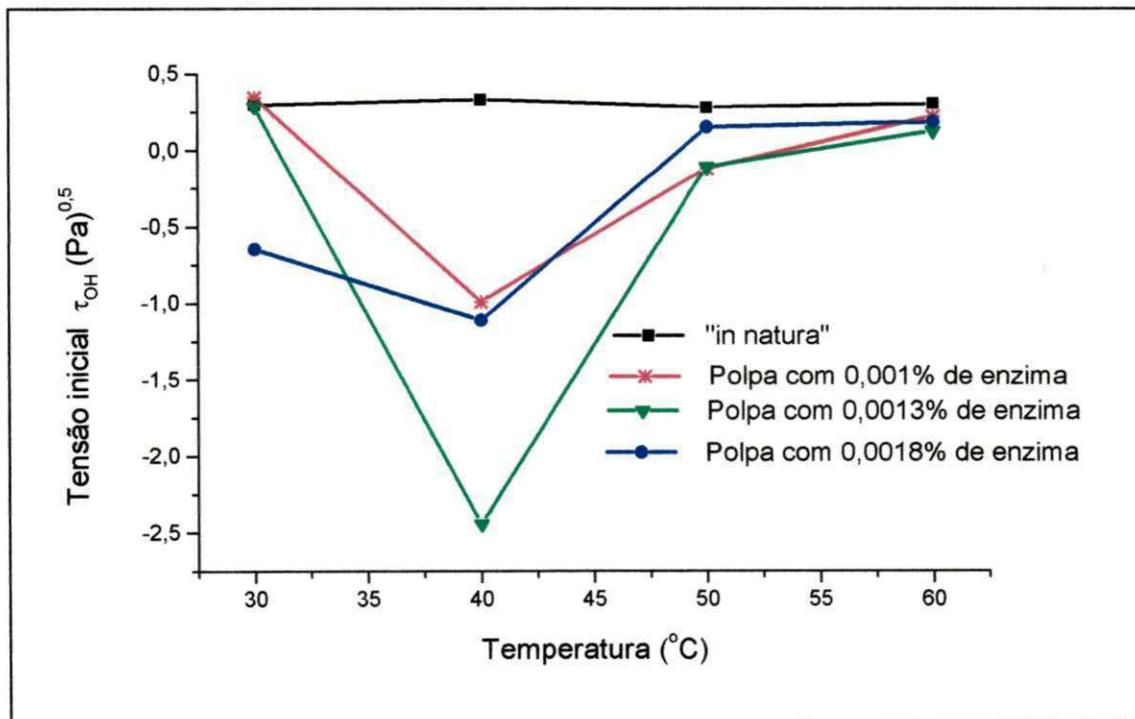


Figura 14 – Polpa de goiaba – Tensão inicial em função da temperatura – Ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley.

As curvas com ajuste do modelo de Herschel-Bulkley encontram-se nas Figuras 15 a 18. Na Figura 15 que corresponde a polpa “in natura” observa-se que não é possível identificar o efeito do aumento da temperatura nesta amostra. Nas amostras despectinizadas (Figuras 16 a 18), ao contrário da polpa “in natura”, as curvas apresentaram um comportamento claramente distinto para cada temperatura, com a tensão de cisalhamento decrescendo gradativamente com o aumento da temperatura. Porém, na polpa com concentração de enzima de 0,0013% (Figura 17) as curvas para as temperaturas de 60 e 70°C ficaram próximas mostrando que para esse caso o aumento da temperatura influenciou de forma menos importante.

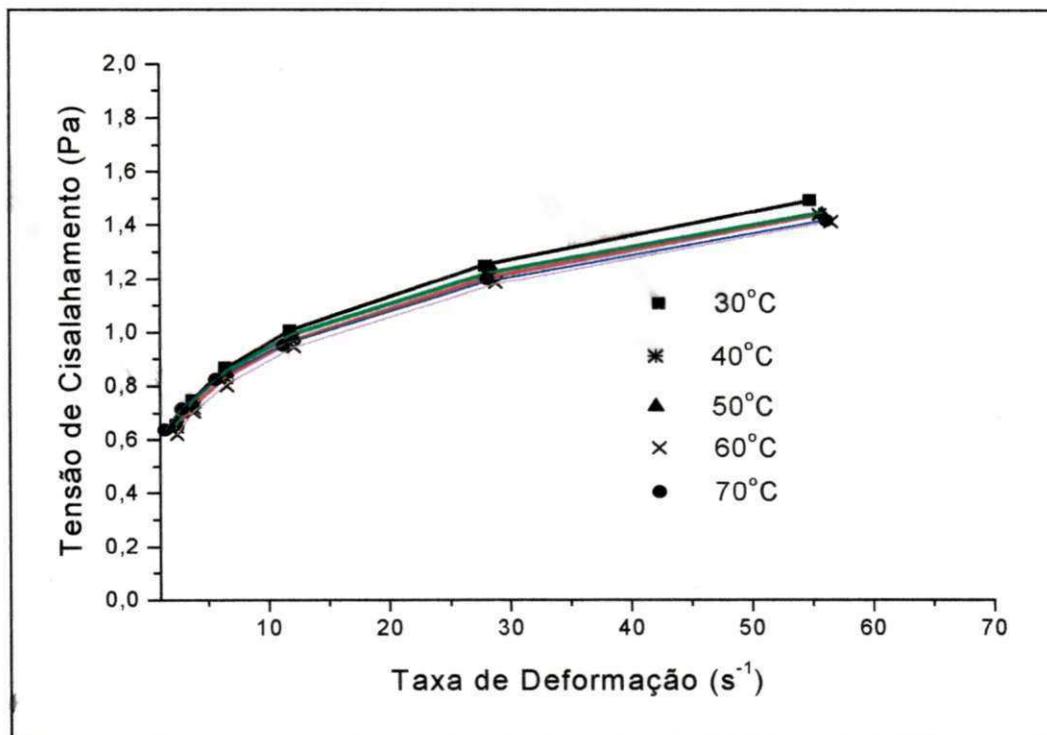


Figura 15 – Polpa de goiaba “in natura” – Tensão de Cisalhamento em função da taxa de deformação – Ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley.

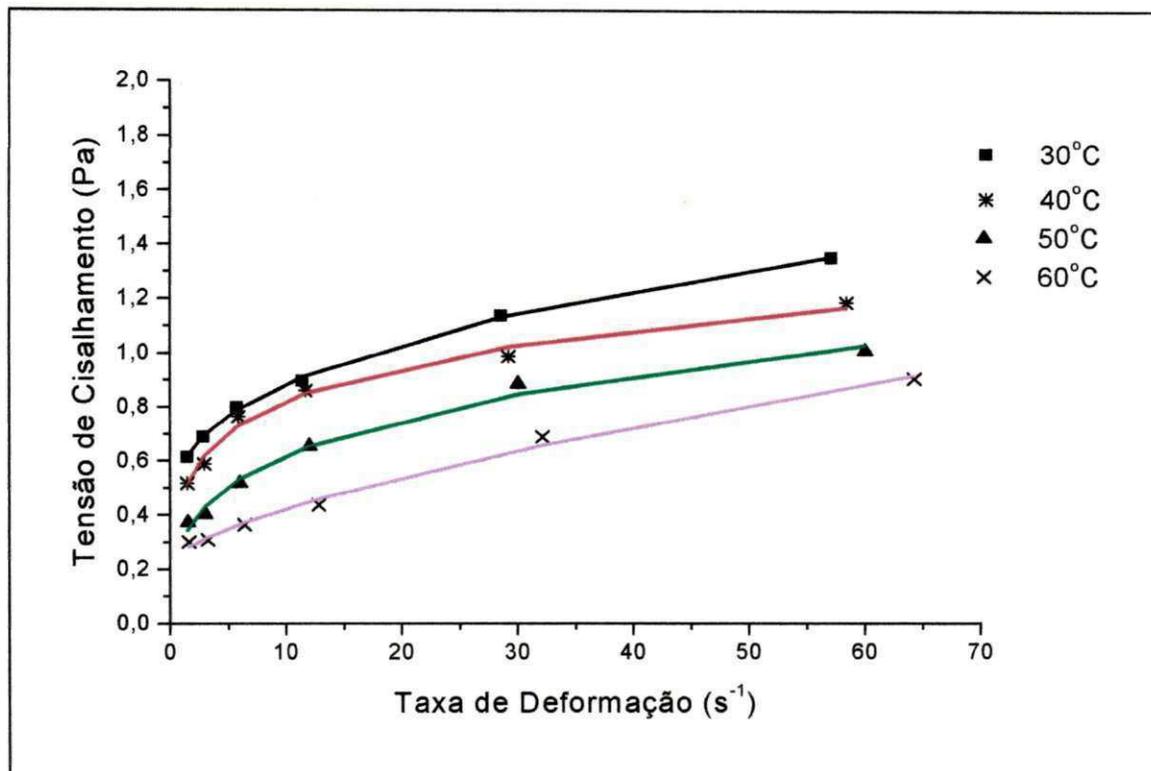


Figura 16 - Polpa de goiaba com concentração de 0,001% de enzima – Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação – Ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley.

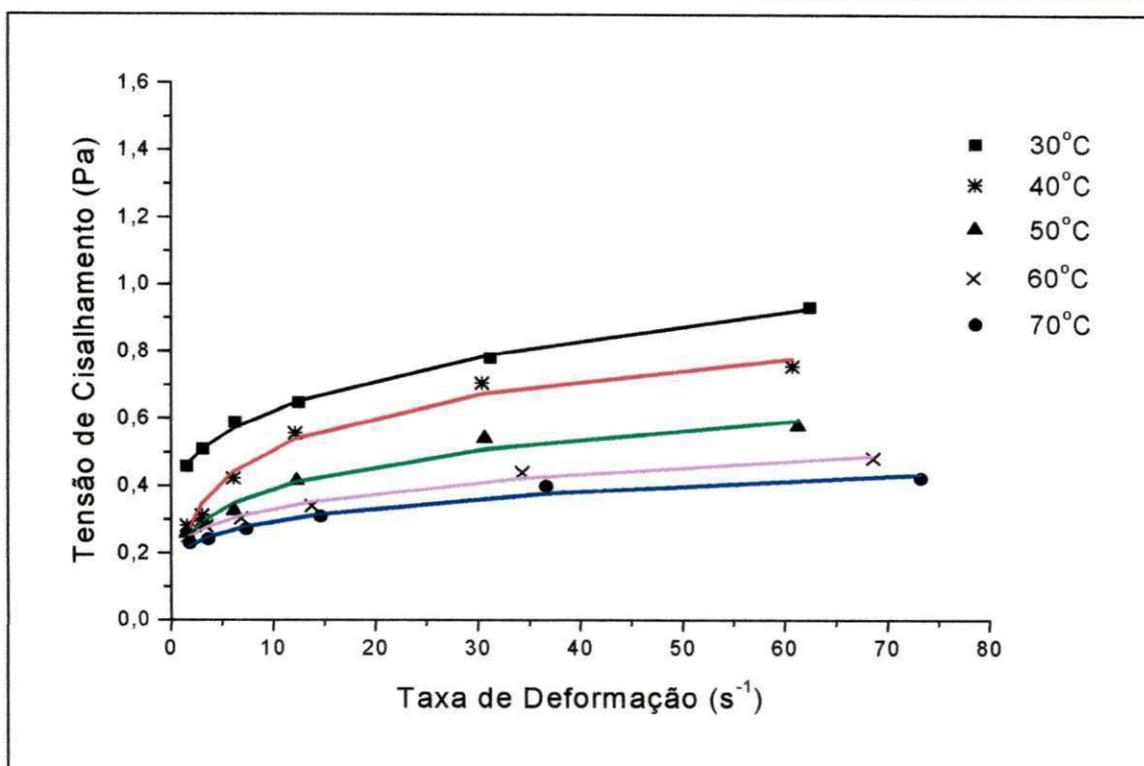


Figura 17 - Polpa de goiaba com concentração de 0,0013% de enzima – Tensão de Cisalhamento em função da taxa de deformação – Ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley.

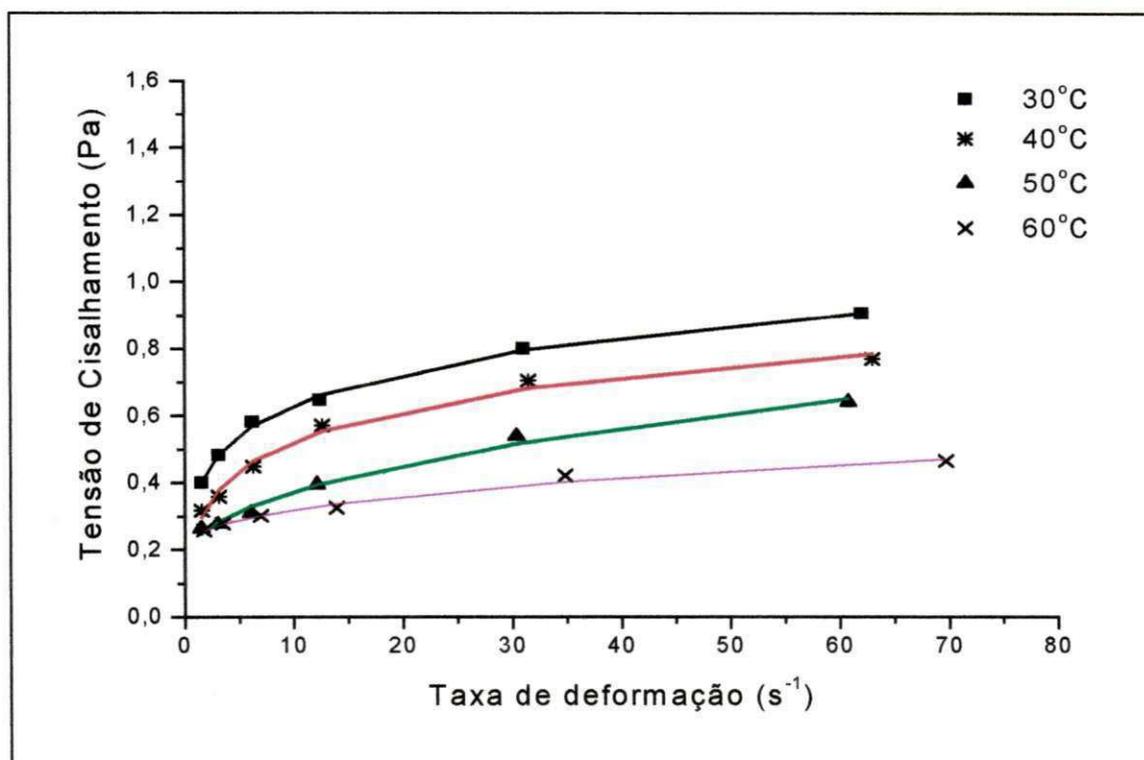


Figura 18 - Polpa de goiaba com concentração de 0,0018% de enzima – Tensão de Cisalhamento em função da taxa de deformação – Ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley.

Na Figura 19 estão representadas as curvas das amostras ajustadas pelo modelo de Herschel-Bulkley à temperatura de 40°C. Pode-se observar a forma como a adição da enzima influenciou no comportamento reológico das amostras de polpa de goiaba estudada. Entre os materiais “in natura” e com 0,001% de enzima ocorre uma diferença de comportamento como se vê na posição das curvas. Entre as amostras com 0,001 e 0,0013% observa-se uma diferença ainda mais acentuada, verificada pelo distanciamento entre as curvas, entretanto, o acréscimo de mais 0,0005% de enzima, representado pela concentração 0,0018% não provocou alteração na posição da curva que descreve esta amostra em relação à curva referente a amostra com 0,0013% de enzima. O conjunto de curvas, apesar disto, indica reduções nas tensões de cisalhamento à medida em que se adicionou a enzima.

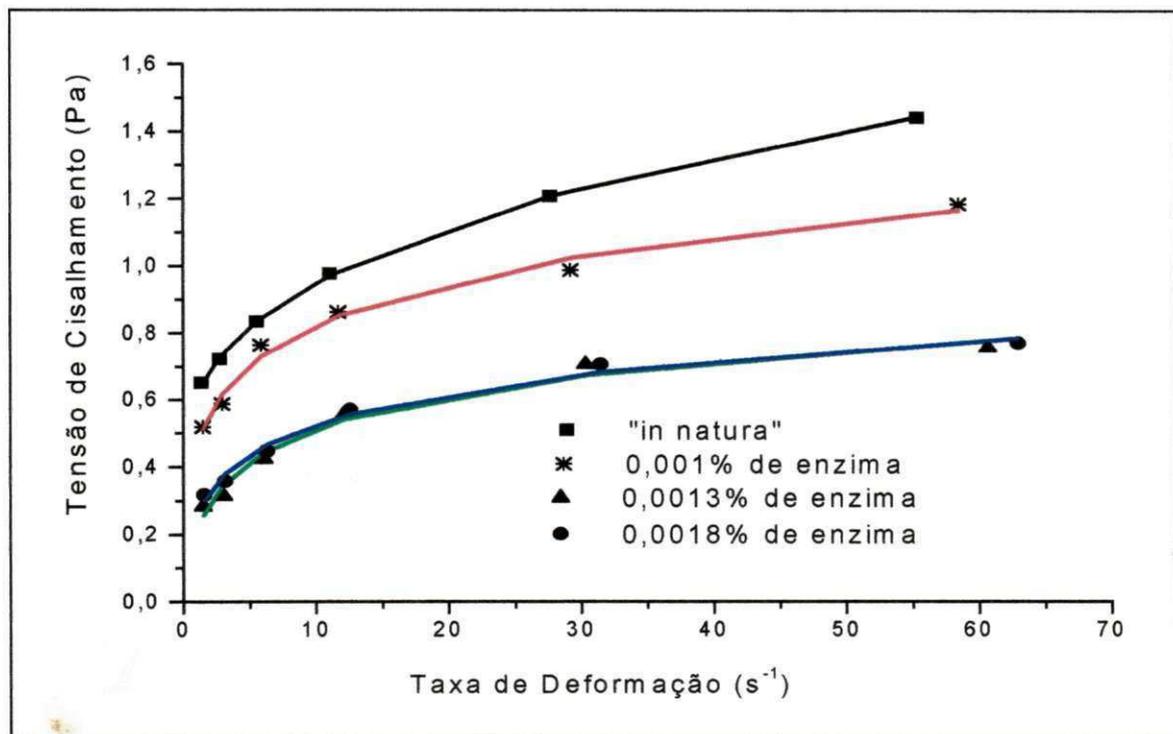


Figura 19 - Polpa de goiaba – Tensão de Cisalhamento em função da taxa de deformação – Ajuste pelo modelo de Herschel-Bulkley à temperatura de 40°C para as amostras utilizadas.

5 – CONCLUSÕES

Nesta pesquisa experimental onde estudou-se o comportamento reológico da polpa de goiaba para as condições do produto “in natura” e com adição de pectinase de 0,001, 0,0013 e 0,0018% nas temperaturas de 30 a 70°C pode-se concluir que:

- Todas as amostras apresentaram comportamento pseudoplástico.
- A adição de pectinase a polpa de goiaba influenciou no seu comportamento reológico, reduzindo o índice de consistência e as tensões de cisalhamento à medida em que aumentou os percentuais de 0,001 de enzima.
- Não se detectou influência definida da adição da enzima pectinase e nem da temperatura sobre o índice de comportamento de fluxo (n) em nenhuma das amostras.
- Na polpa “in natura” o índice de consistência (k) não sofreu alteração com o aumento da temperatura, entretanto, nas amostras com adição da enzima esse fato sofreu oscilações. Os valores da tensão inicial da polpa “in natura” apresentaram pequenas variações com o aumento da temperatura.
- Dentre os modelos de Ostwald-de-Waele, Casson e Herschel-Bulkley utilizados para descrever o comportamento reológico da polpa de goiaba, o de Herschel-Bulkley apresentou os melhores parâmetros de ajuste, devido ao fato de apresentarem os melhores valores de R^2 .

6 – SUGESTÕES

Nos últimos anos o comércio de polpa de frutas, apresentou um crescimento acentuado, principalmente de frutas regionais (açai, babaçu, cajá, umbu) que são encontradas apenas no período de safra. Por isso, seria importante realizar trabalhos na área de reologia com, tais frutas para a adaptação dos processos industriais e elaboração de derivados dessas frutas, visto que poucos trabalhos retratando este aspecto, estão disponíveis na literatura pertinente.

A maioria dos trabalhos de reologia de frutas concentra-se em verificar o efeito da temperatura e dos sólidos solúveis, portanto faz-se necessário mais estudos a respeito dos outros constituintes das frutas tais como pectina e fibra., visto que tais constituintes podem influenciar no processamento das frutas.

- CASTALDO, D.; PALMIERE, L.; LO, V.O.A.; COSTABILE, P. Flow properties of babaco (*Carica Pentagona*) purees and concentrates. **Journal of Texture Studies**, Parma, v.3, n.21, p.253-264. 1990.
- CHIAMPO, F.; TASSO.M.; OCCELLI. A.; CONTI, R. Rheological properties of fruit pures. **Industria Conserve**, Torino, v.3, p.331-336,1996.
- CUNHA, L.M.; CARRARO. A.F.; CUNHA, M.M. Manual de exportação de frutas. **FRUPEX**, Brasília, DF: EMBRAPA, 1994, 32p.
- FODA, Y.H.; McCOLLUM, J.P. Viscosity as affeted by various constituents of tomato juice. **Journal of Food Science**, Urbana, v.35, p.33-338, 1970.
- GASPARETTO, C.A.; GEHRKE, T. **Reologia**. Campinas, SP: UNICAMP, 1995. 20p. Apostila.
- GEHRKE, T. **Reometria de suco concentrado de frutas**. Campinas,SP: UNICAMP, 1996, 103p. Dissertação de Mestrado.
- GUERRERO,S.; ALZAMORA, L.N.; ALZAMORA, S.M. Reologia de pures de frutas tropicales y su relacion com distintos factores de conservacion. In: I Congreso Ibero-Americano de Ingenieria de Alimentos. Campinas, SP: Unicamp. **Anales...** Valencia: UPV, 1995.
- IBARZ, A; GARVIN,A; COSTA, J.; Flow behaviour of concentrated ioquat juice. **Alimetaria**, Lleida, v.8, n.268, p.65-68, 1995.
- IBARZ, A; GONZALEZ, C; ESPLUGAS, S. Rheology of clarified fruit juices: Orange juices. **Journal of Food Engineering**, Lleida, v.21, n.4, p.485-494, 1994.

- IBARZ, A.; GONZALEZ, C.; ESPLUGAS, S.; VICENTE, M. Rheology of clarified fruit juices: I - peach juices. **Journal of Food Engineering**, Lleida, v.15, n.1, p.49-61, 1992.
- IBARZ, A.; MARCO, F.; PAGAN, J. Rheology of persimmon juices. **Fruit Processing**, Lleida, v.3, n.5, p.182-187, 1993.
- KHALIL, K.E.; RAMAKRISHNA, P.; NANJUNDASWAMY, A.M.; PATWARDHAN, M.V.; Behaviour of clarified banana juice: Effect of temperature and concentration. **Journal of Food Engineering**, Cairo, v.3, n.10, p.231-240, 1989.
- MACHADO, J.C.V. **Reologia e viscometria**. Petrobras, 1996, 73p. Apostila.
- MAIA, G.A.; OLIVEIRA, G.S.F.; FIGUEIRREDO, R.W.F.; GUIMARÃES, A.C.L. **Tecnologia em processamento de sucos e polpas tropicais**. Brasília: editado pela ABEAS, 1998, v.1, 104p.
- MITSCHKA, P. Simple conversion of brookfield RVT. readings into viscosity functions. **Rheol. Acta**, Prague, v.21, p.207-209, 1982.
- MULLER, H.G. **Introduccion a la reologia de los alimentos**. Zaragoza: Editora Acribia, 1977, 173p.
- NETO, L.G.; SOARES, J.M. Goiaba para exportação: Aspectos técnicos da produção. **FRUPEX**, Brasília: EMBRAPA, 1994, p.9-13.

- OLIVEIRA, R.P.S.; MENEGALLI, F. C.; Comportamento reológico de suco de acerola. In: Congreso Ibero-Americano de Ingeniería de Alimentos, 2, 1998, Bahía Blanca, Argentina. **Anales...** Bahía Blanca: PALPIQUI. (Publicação em CD)
- PREGNOLATTO, W.; PREGNOLATTO, N.P. Normas analíticas: **-Métodos químicos e físicos para análise de alimentos**. Instituto Adolfo Lutz, São Paulo, v.1, 3º ed., 1985, 533p.
- QUEIROZ, A.J.M. **Estudo do comportamento reológico dos sucos de abacaxi e manga**. Campinas,SP: UNICAMP, 1998, 170p. Tese de Doutorado.
- RANGANA, S.; **Manual of analysis of fruit and vegetable products**. New Delli: Tata McGraw. Hill Publishing Company Limited, 1978, 634p.
- RAMOS, A.M.; IBARZ, A. Evaluación tixotrópica en derivados de frutas. In: Congreso Ibero-Americano de Ingeniería de Alimentos, 2, 1998, Bahía Blanca, Argentina. **Anales...** Bahía Blanca: PALPIQUI. (Publicação em CD)
- RAO, M.A.; PALOMINO, N.O. Flow properties of tropical fruits purees. **Journal of Food Science**, Campinas, v.39 , p.160-161, 1974.
- RAO, M.A.; STEFFE, J.F. Measuring yield stress of fluid foods. **Food Technology**, Geneva, v.51, n.2, p.50-52, 1997.
- ROJO, S.O.; CASTRO, M.E.; MIRANDA, M.M.; PARRA, V.E.; GUARDA, M.A.; Rheological properties of grape juice. **Alimentos**, Santiago, v.4, n.19, p.5-10, 1994.

- SARAVACOS, G.D. Effect of temperature on viscosity of fruits juice and purees. **Journal of Food Science**, v.35, p.122-125, 1970.
- SREENATH, H.K.; NANJUNDASWAMY, A.M.; SREEKANTIAH, K.R. Effect of various cellulases and pectinases on viscosity reduction of mango pulp. **Journal of Food Science, India**, v.52, n.1, p.230-231, 1987.
- TELLO, F.; PASQUEL, A.; TREVEJO, E. Uso de reometria capilar para la caracterizacion reologica de nectares de frutas de *Solanum topiro*. In: I Congreso Ibero-Americano de Ingeniería de Alimentos. Campinas, SP: Unicamp. **Anales...** Valencia: UPV, 1995.
- TOCCHINI, R.P.; NISIDA, A.L.A.C.; MARTIN, Z.J. de. **Industrialização de polpas, sucos e néctares de frutas**. Campinas: ITAL, 1995, 57p. Apostila.
- TRIFIRO, A.; SIMONE, L. de.; GHERARDI, S. Temperature effects on rheological parameters of vegetable food fluids in relation to their pulp contents. **Industria-conserve**, Parma, v.2, n.69, p.139-147, 1995.
- VITALI, A.A.; RAO, M.A.; Flow behavior of guava puree as a function of temperature and concentration. **J. Texture Studies.**, Geneva, v.13, n.3, p.275-289, 1982.
- ROLIN, G. Pectin. In: WHISTLER, R.; BEMILLER, J.N. 3^oed. **Industrial gums: Polysaccharides and their derivatives** Londres: Academic Press, 1993, cap.10, p.258-278.
- WHITTEMBERGER, R.T.; NUTTING, G.C. Effect of tomato cell structures on consistency of tomato juice. **Food Technology**, Philadelphia, v.13, p.19-22, 1957.

APÊNDICE A

Reogramas referentes às polpas de goiaba “in natura” e despectinizada. Ajuste pelo modelo de Ostwald-de-Waele.

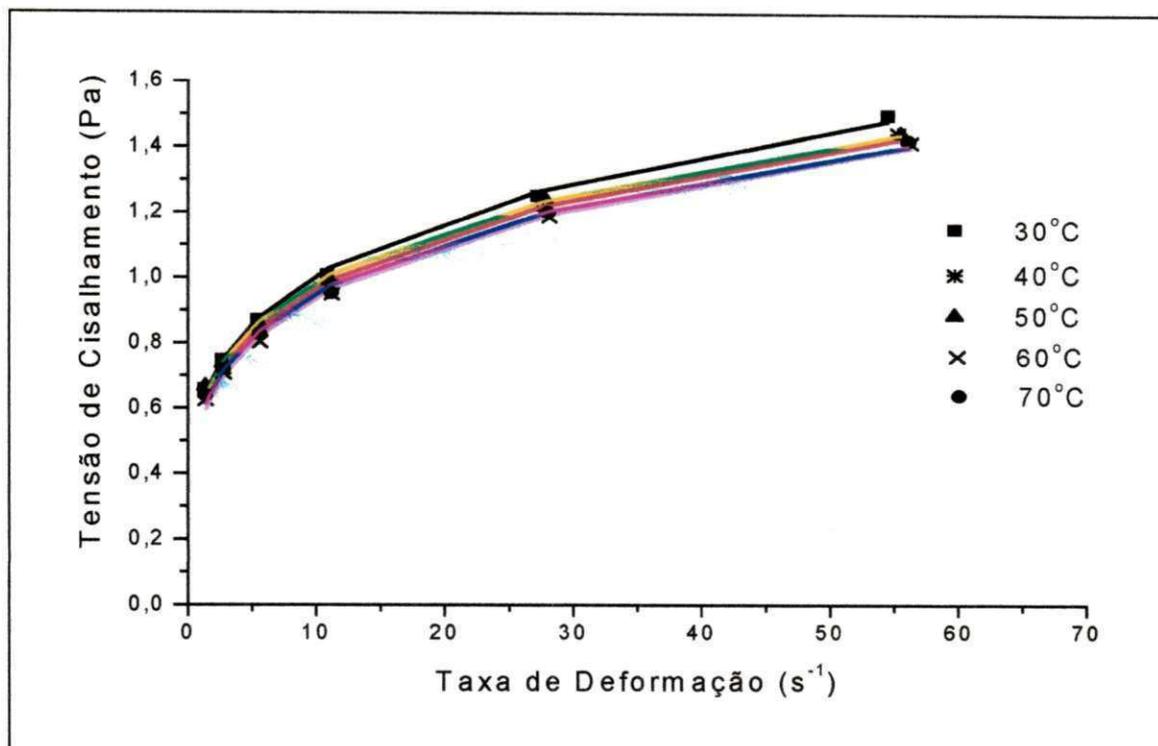


Figura A.1 - Polpa de goiaba “in natura”. – Tensão de Cisalhamento em função da taxa de deformação – Ajuste pelo modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência).

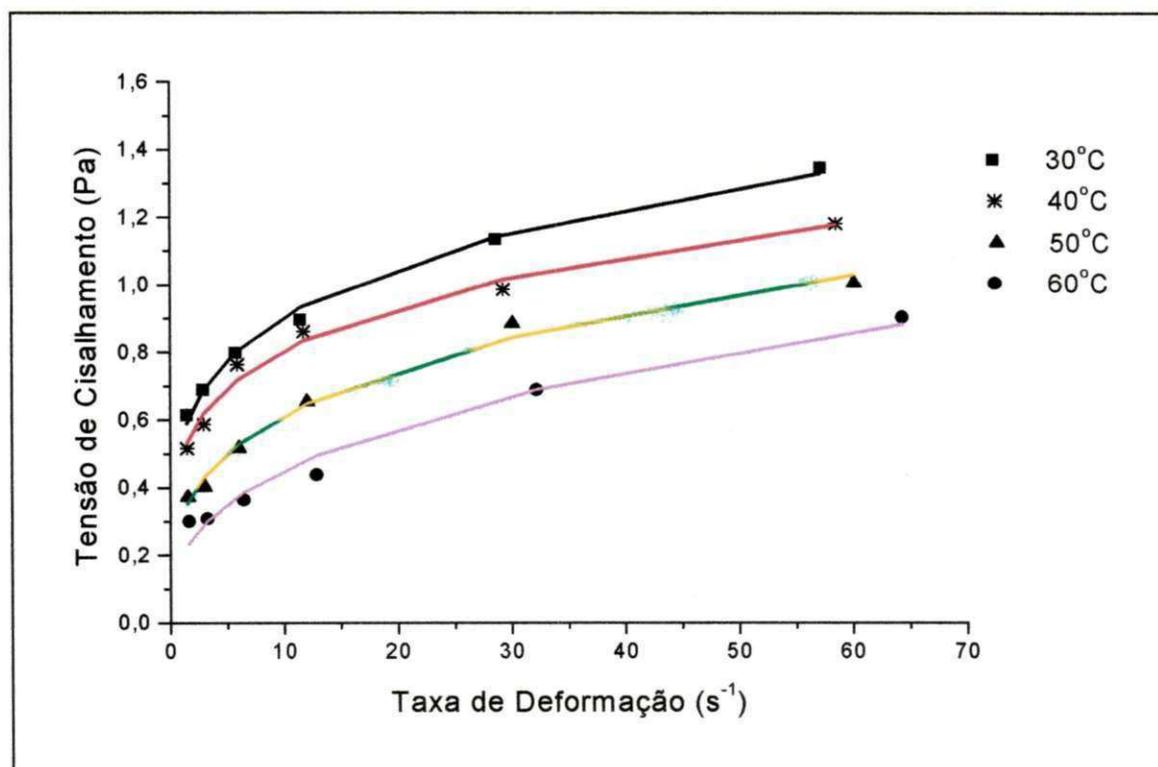


Figura A.2 - Polpa de goiaba com concentração de 0,001% de enzima – Tensão de Cisalhamento em função da taxa de deformação – Ajuste pelo modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência).

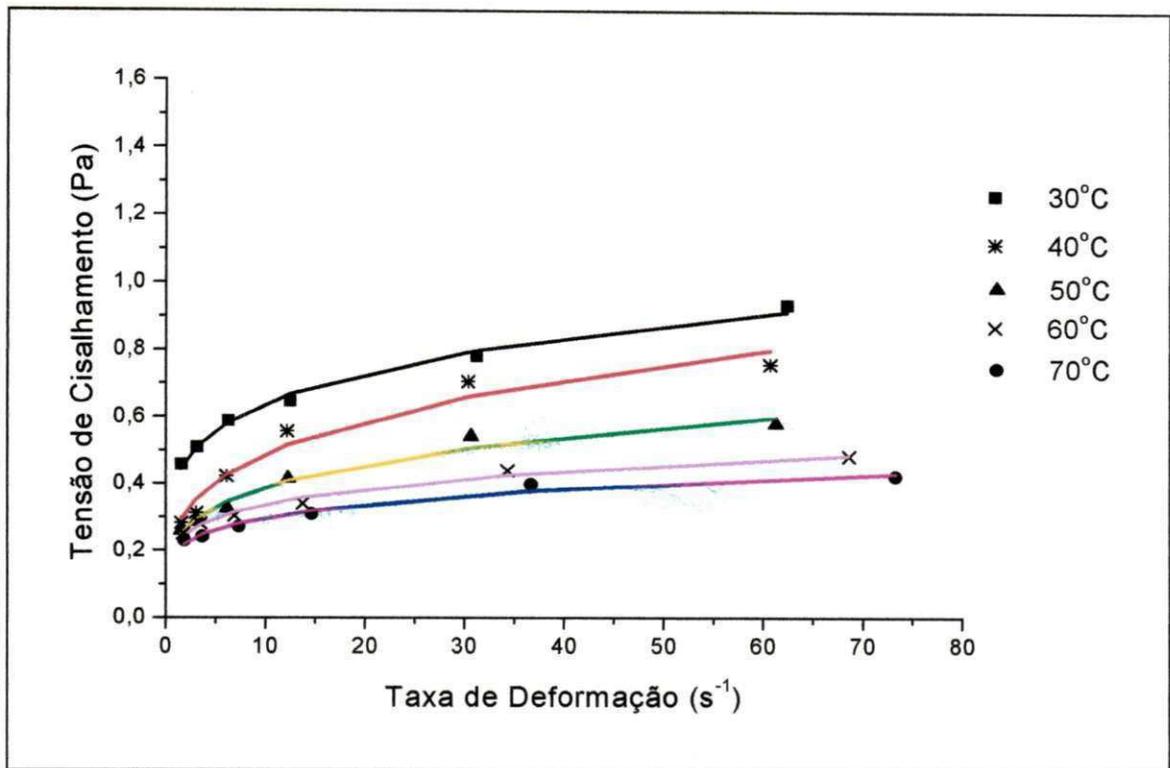


Figura A.3 - Polpa de goiaba com concentração de 0,0013% de enzima – Tensão de Cisalhamento em função da taxa de deformação – Ajuste pelo modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência).

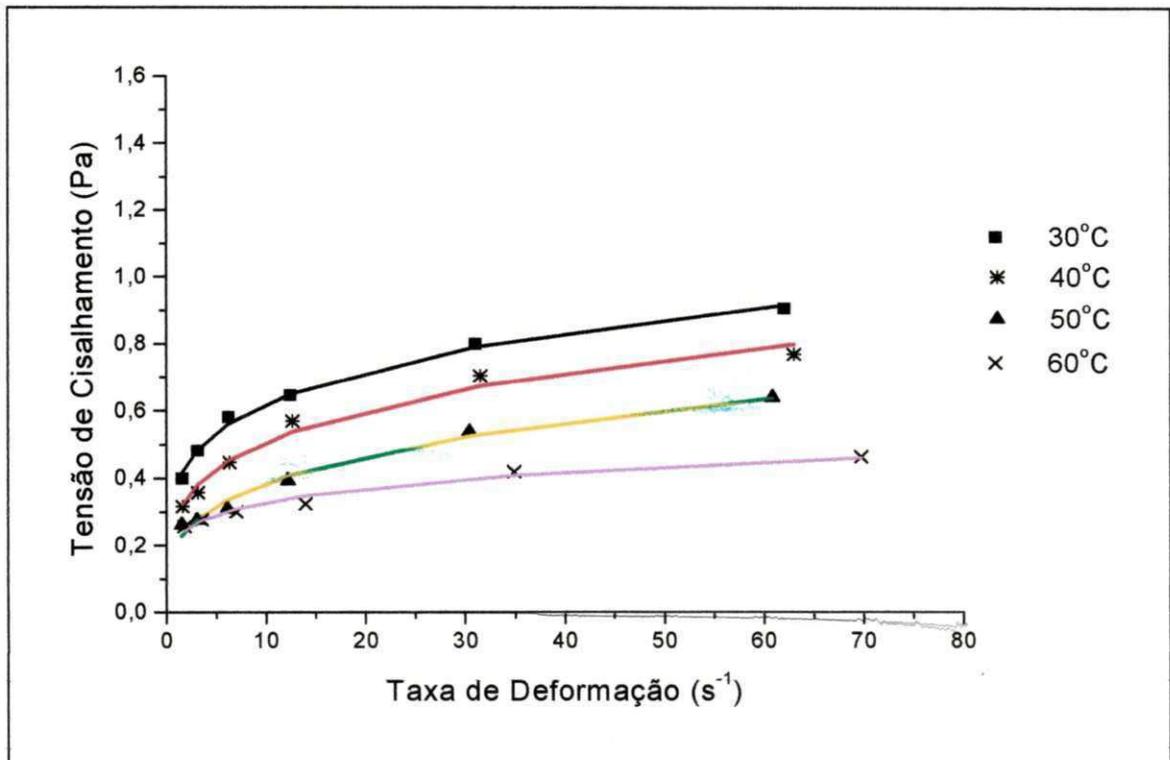


Figura A.4 - Polpa de goiaba com concentração de 0,0018% de enzima – Tensão de Cisalhamento em função da taxa de deformação – Ajuste pelo modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência).

APÊNDICE B

Reogramas referentes às polpas de goiaba “in natura” e despectinizada. Ajuste pelo modelo de Casson

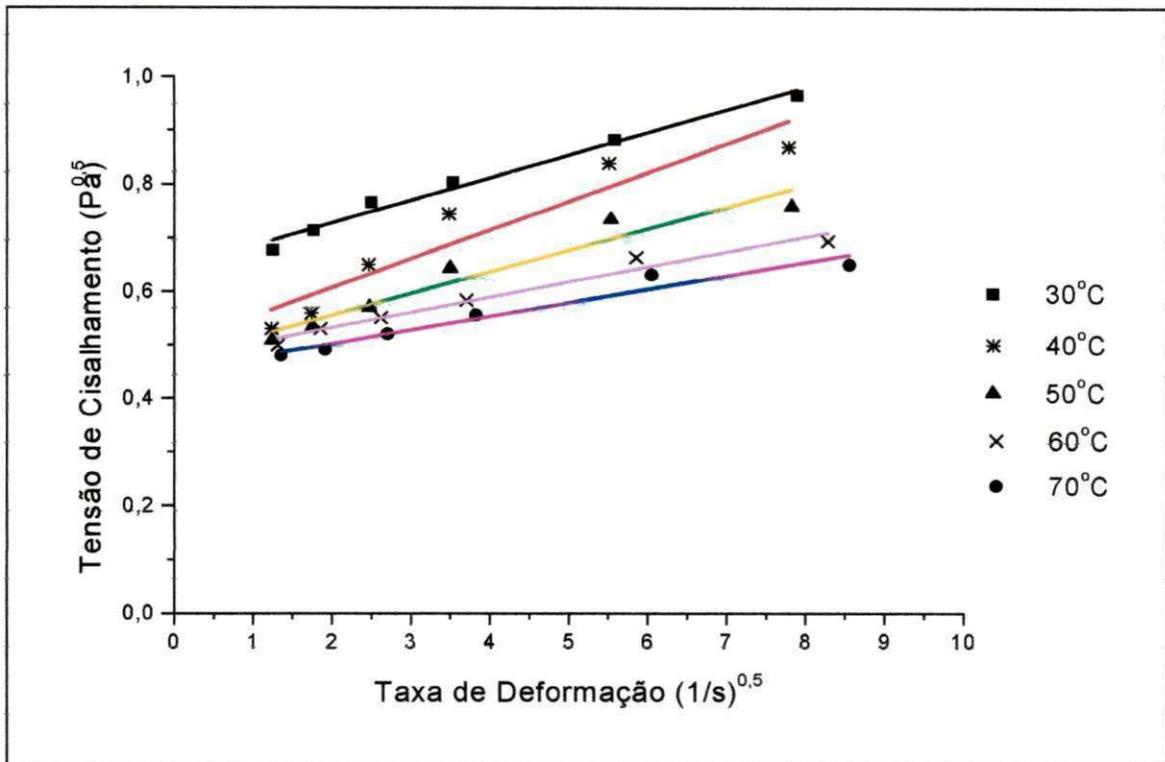


Figura B.3 - Polpa de goiaba com concentração de 0,0013% de enzima – Tensão de Cisalhamento em função da taxa de deformação – Ajuste pelo modelo de Casson.

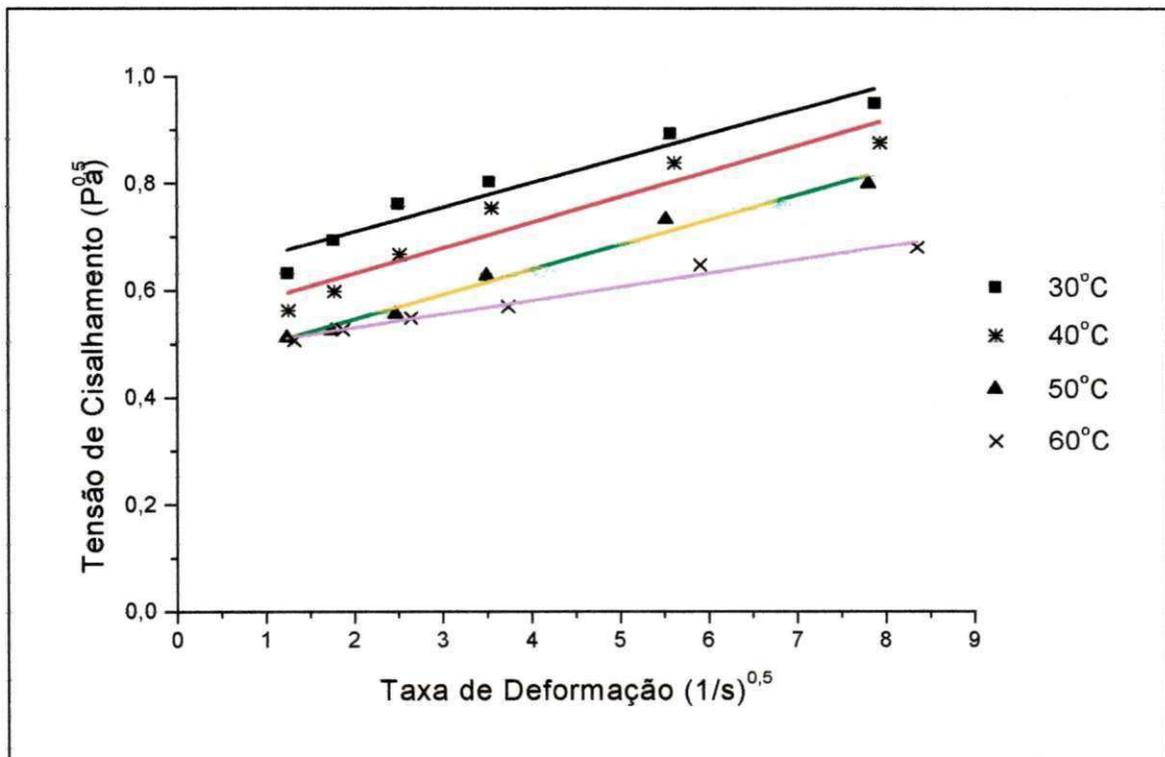


Figura B.4 - Polpa de goiaba com concentração de 0,0018% de enzima – Tensão de Cisalhamento em função da taxa de deformação – Ajuste pelo modelo de Casson.

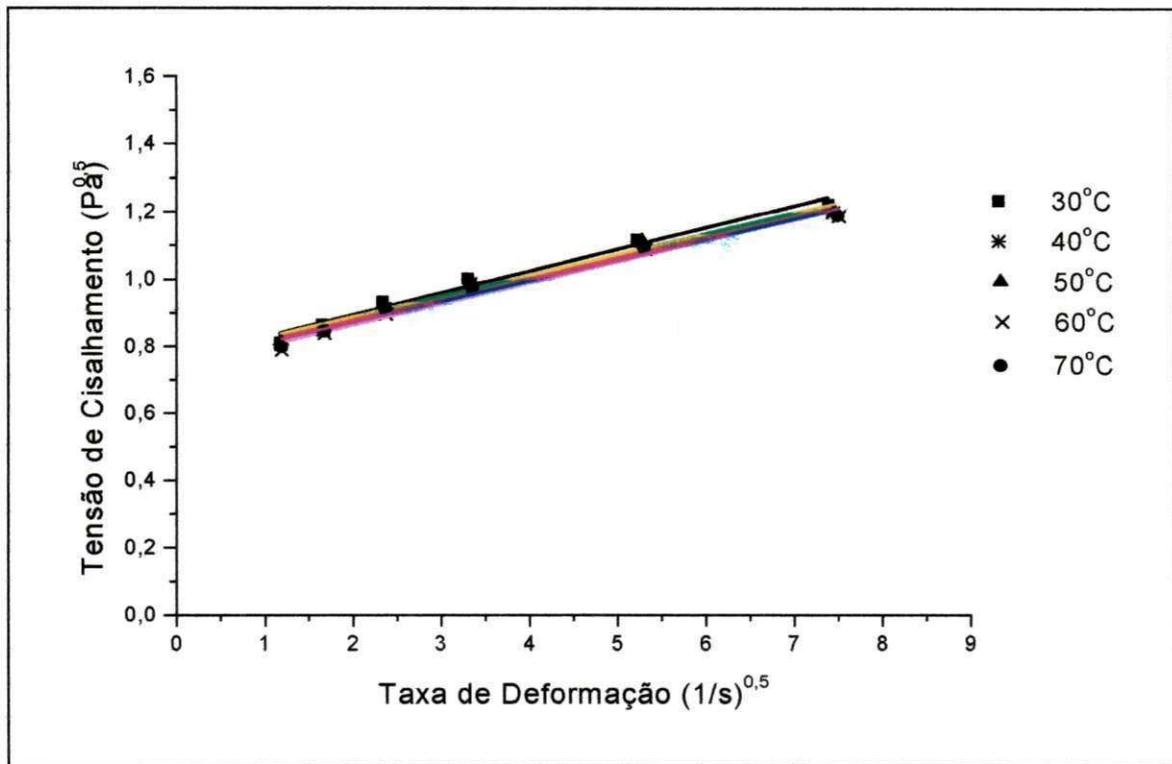


Figura B.1 - Polpa de goiaba "in natura" – Tensão de Cisalhamento em função da taxa de deformação – Ajuste pelo modelo de Casson.

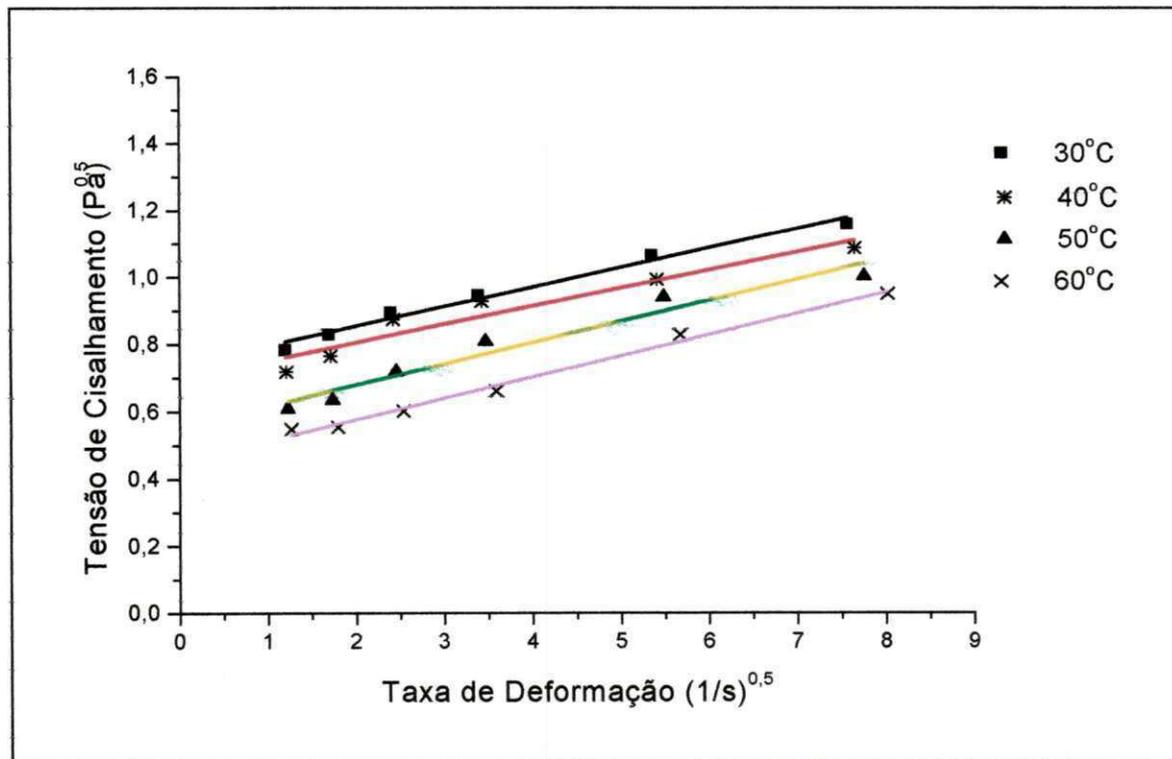


Figura B.2 - Polpa de goiaba com concentração de 0,001% de enzima – Tensão de deformação em função da taxa de deformação – Ajuste pelo modelo de Casson.

APÊNDICE C

Valores das tensões de cisalhamento e da taxas de deformação utilizadas no ajuste dos modelos de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), Casson e Herschel-Bulkley.

Tabela C.1 – Valores de tensões de cisalhamento e taxas de deformação.

| Temperatura (°C) | "in natura" | | 0,001% de enzima | | 0,0013% de enzima | | 0,0018% de enzima | |
|------------------|-------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|
| | τ (Pa) | γ (s ⁻¹) | τ (Pa) | γ (s ⁻¹) | τ (Pa) | γ (s ⁻¹) | τ (Pa) | γ (s ⁻¹) |
| 30 | 0,6580 | 1,3643 | 0,6150 | 1,4279 | 0,4582 | 1,5604 | 0,3995 | 1,5501 |
| | 0,7481 | 2,7286 | 0,6893 | 2,8558 | 0,5092 | 3,1209 | 0,4817 | 3,1003 |
| | 0,8695 | 5,4573 | 0,7990 | 5,7115 | 0,5875 | 6,2417 | 0,5816 | 6,2005 |
| | 1,0066 | 10,914 | 0,8969 | 11,4231 | 0,6462 | 12,4835 | 0,6462 | 12,4011 |
| | 1,2494 | 27,2863 | 1,1358 | 28,5576 | 0,7794 | 31,2087 | 0,7990 | 31,0027 |
| | 1,4962 | 54,5727 | 1,3473 | 57,1153 | 0,9322 | 62,4174 | 0,9047 | 62,0054 |
| 40 | 0,6502 | 1,3841 | 0,5170 | 1,4609 | 0,2820 | 1,5172 | 0,3172 | 1,5745 |
| | 0,7207 | 2,7681 | 0,5875 | 2,9218 | 0,3133 | 3,0344 | 0,3583 | 3,1489 |
| | 0,8343 | 5,5363 | 0,7637 | 5,8437 | 0,4230 | 6,0687 | 0,4465 | 6,2980 |
| | 0,9753 | 11,0725 | 0,8617 | 11,6874 | 0,5562 | 12,1375 | 0,5699 | 12,5960 |
| | 1,2063 | 27,6813 | 0,9870 | 29,2185 | 0,7050 | 30,3437 | 0,7050 | 31,4899 |
| | 1,4413 | 55,3627 | 1,1828 | 58,4371 | 0,7559 | 60,6874 | 0,7696 | 62,9799 |
| 50 | 0,6658 | 1,3898 | 0,3721 | 1,5010 | 0,2590 | 1,5316 | 0,2625 | 1,5198 |
| | 0,7363 | 2,7795 | 0,4034 | 3,0020 | 0,2852 | 3,0632 | 0,2756 | 3,0396 |
| | 0,8538 | 5,5591 | 0,5170 | 6,0041 | 0,3255 | 6,1263 | 0,3097 | 6,0792 |
| | 0,9870 | 11,1184 | 0,6541 | 12,0082 | 0,4147 | 12,2526 | 0,3937 | 12,1584 |
| | 1,2416 | 27,7953 | 0,8852 | 30,0205 | 0,5407 | 30,6316 | 0,5381 | 30,3960 |
| | 1,4413 | 55,5907 | 1,0066 | 60,0411 | 0,5775 | 61,2631 | 0,6405 | 60,7920 |
| 60 | 0,6227 | 1,4089 | 0,3016 | 1,6071 | 0,2502 | 1,7148 | 0,2572 | 1,7432 |
| | 0,7050 | 2,8178 | 0,3094 | 3,2141 | 0,2817 | 3,4296 | 0,2782 | 3,4864 |
| | 0,8029 | 5,6356 | 0,3642 | 6,4283 | 0,3045 | 6,8591 | 0,3019 | 6,9728 |
| | 0,9478 | 11,2711 | 0,4387 | 12,8560 | 0,3412 | 13,7182 | 0,3255 | 13,9456 |
| | 1,1867 | 28,1778 | 0,6893 | 32,1415 | 0,4410 | 34,2956 | 0,4200 | 34,8641 |
| | 1,4139 | 56,3556 | 0,9047 | 64,2831 | 0,4830 | 68,5912 | 0,4646 | 69,7282 |
| 70 | 0,6384 | 1,4040 | — | — | 0,2310 | 1,8323 | — | — |
| | 0,7167 | 2,8080 | — | — | 0,2415 | 3,6646 | — | — |
| | 0,8264 | 5,6159 | — | — | 0,2712 | 7,3293 | — | — |
| | 0,9517 | 11,2318 | — | — | 0,3097 | 14,6586 | — | — |
| | 1,1985 | 28,0795 | — | — | 0,3990 | 36,6465 | — | — |
| | 1,4178 | 56,1590 | — | — | 0,4235 | 73,2930 | — | — |