

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

ADRIANO CESAR CALANDRINI BRAGA

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO TAMANHO DE
PARTÍCULAS NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO
SUCO DE ABACAXI ãPÉROLAö (*Ananas comosus* (L.)
Merr.)

Belém-PA

2007



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

ADRIANO CESAR CALANDRINI BRAGA

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO TAMANHO DE
PARTÍCULAS NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO
SUCO DE ABACAXI òPÉROLAö (*Ananas comosus* (L.)
Merr.)

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Ciência e
Tecnologia de Alimentos da Universidade
Federal do Pará, para a obtenção do grau de
Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Antonio Manoel da Cruz Rodrigues

Belém-PA

2007



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

ADRIANO CESAR CALANDRINI BRAGA

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO TAMANHO DE PARTÍCULAS
NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO SUCO DE ABACAXI
õPÉROLAö (*Ananas comosus* (L.) Merr.)

Data da avaliação: ____/____/____

Situação: _____

BANCA EXAMINADORA:

Profº Dr. Antonio Manoel da Cruz Rodrigues
(Orientador ó CT/DEQAL/UFPA)

Profª Drª Alessandra dos Santos Lopes
(Membro ó CT/DEQAL/UFPA)

Pesquisadora Drª Maristela de Fátima Simplício Santana
(Membro ó Embrapa/CPATU)

Pesquisadora Drª Rafaella de Andrade Mattietto
(Membro ó Embrapa/CPATU)

Aos meus amados pais (Geraldo e Ray) por todo seu amor e ao meu irmão Anderson pelo companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me iluminado durante esses dois anos, ajudando a superar todas as dificuldades que surgiram no caminho.

Aos meus pais e meu irmão pelo carinho, compreensão e força em todos os momentos de minha vida. Amo vocês.

Ao professor Dr. Antonio Rodrigues pela orientação, amizade e aulas de fenômenos de transporte e operações unitárias que foram de grande utilidade durante a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Rosinelson Pena e ao professor Dr. Hervé Rogez pelo auxílio e disponibilidade em muitos momentos de dúvidas sobre algumas análises.

Aos amigos Francylla, Carol, Anderson e Heloísa pela ajuda na realização de algumas análises deste trabalho.

Ao amigo Darly pelos jogos de bilhar, a bola de sábado e principalmente pela atenção e paciência no auxílio das análises estatísticas, muito obrigado.

Aos amigos Alessandra Eluan, Ana Carla Pelais, Carissa Bichara e Victor Lamarão pela amizade e momentos de descontração desde os tempos da graduação.

A todos os amigos da inesquecível ãNata do LEQö, pelos momentos de alegria no Sintonia e no Carnaleqal.

A empresa Novozymes pela concessão da enzima Pectinex XXL, utilizada nos experimentos.

Ao CNPq pelo apoio financeiro para a minha total dedicação.

A todos que direta ou indiretamente participaram da realização deste trabalho. Muito obrigado.

RESUMO

Neste trabalho foi avaliada a influência da temperatura e do tamanho de partículas sobre o comportamento reológico do suco de abacaxi (*Ananas comosus L.*) natural e tratado com enzimas pectinolíticas. A polpa de abacaxi utilizada para a obtenção das amostras, apresentou elevados teores de açúcares. Testes preliminares indicaram através da análise de variância que as variáveis temperatura e tempo de tratamento exerceram efeito estatisticamente significativo ($p < 0,05$) sobre a concentração de pectina, sendo então o tratamento enzimático realizado com uma concentração de enzima de 150 mg/L, temperatura de 50°C e tempo de tratamento de 80 minutos. O modelo de Mizrahi-Berk foi ajustado aos dados obtidos experimentalmente e descreveu bem o comportamento das amostras do suco de abacaxi analisado, apresentando elevados coeficientes de correlação ($R^2 > 0,98$). As amostras naturais e despectinizadas apresentaram, em sua maioria, comportamento não-newtoniano com características de fluidos pseudoplásticos ($n < 1$). A viscosidade aparente das amostras naturais e despectinizadas diminuiu com o aumento da temperatura e da taxa de deformação. Os valores da energia de ativação calculados a uma taxa de deformação de 103 s^{-1} foram maiores nas amostras despectinizadas. O tamanho de partícula exerceu influência sobre a viscosidade aparente, sendo os menores valores observados nas amostras centrifugadas. O tratamento enzimático proporcionou uma redução na viscosidade aparente das amostras do suco de abacaxi em todas as temperaturas utilizadas.

ABSTRACT

The influence of temperature and particle size in the rheological behavior from the natural and treated (with pectinolytic enzymes) pineapple (*Ananas comosus L.*) juice, was evaluated in this work. The pineapple pulp used in obtainment of the samples, presented quantities by sugars elevated. Preliminary tests results showed the variables temperature and treatment time were statistically significant ($p < 0.05$) to decrease in the pectin concentration. The enzymatic treatment was carried out with 150mg/L of enzyme concentration, temperature at 50°C and treatment time of 80 minutes. The Mizrahi-Berk model was adjusted to the experimental data and well described rheological behavior of the pineapple juice samples, presenting raised correlation coefficients ($R^2 > 0.98$). Natural and enzyme treated samples of pineapple juice showed, in the majority of the cases, a non-Newtonian behavior, with pseudoplastic fluids characteristics ($n < 1$). The apparent viscosity of the samples (naturals and enzyme treated) decreased with the temperature and shear rate increase. The activation energy value estimated to despectinized samples at 103s^{-1} was higher when compared the natural samples. The apparent viscosity was affected by particle size, the lowest values were observed on the centrifugated samples. The apparent viscosity of pineapple juice was reduced with enzymatic treatment in all temperatures used.

Lista de Figuras

Figura 1. Foto do abacaxi ôpérolaö.	13
Figura 2. Fluxograma do processamento do suco de abacaxi.	15
Figura 3. Classificação do comportamento reológico dos fluidos.....	19
Figura 4. Curvas de escoamento típicas de fluidos.....	21
Figura 5. Estrutura das partículas em suspensão.	24
Figura 6. Estrutura química da cadeia de pectina.	29
Figura 7. Atuação de diferentes tipos de pectinases sobre as substâncias pécticas.....	30
Figura 8. Estrutura química dos ácidos pécticos.	31
Figura 9. Estrutura das galactomananas ó galactose (G), manose (M).....	31
Figura 10. Fluxograma de obtenção da polpa de abacaxi.	33
Figura 11. Equipamento utilizado na determinação do comportamento reológico das amostras do suco de abacaxi.	38
Figura 12. Acessórios do viscosímetro LVDV II.	38
Figura 13. Efeito da concentração de enzima e da temperatura sobre a concentração de pectina.	43
Figura 14. Efeito do tempo de tratamento e da temperatura sobre a concentração de pectina.	43
Figura 15. Influência da temperatura descrita pelo modelo de Mizrahi-Berk para a amostra AN1.....	49
Figura 16. Influência da temperatura descrita pelo modelo de Mizrahi-Berk para a amostra AD1.....	49
Figura 17. Relação entre viscosidade aparente e taxa de deformação para a amostra AN1... 51	51
Figura 18. Relação entre viscosidade aparente e taxa de deformação para a amostra AD1... 52	52
Figura 19. Efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente das amostras do suco de abacaxi ajustado pela equação de Arrhenius.	53
Figura 20. Influência do tamanho de partículas sobre os dados das amostras naturais ajustados pelo modelo de Mizrahi-Berk a 25°C.....	55
Figura 21. Influência do tamanho de partículas sobre os dados das amostras despectinizadas ajustados pelo modelo de Mizrahi-Berk a 25°C.....	55
Figura 22. Influência do tratamento enzimático sobre as amostras 1 e 2, ajustadas pelo modelo de Mizrahi-Berk a 50°C.....	58
Figura 23. Influência do tratamento enzimático sobre as amostras centrifugadas ajustadas pelo modelo Mizrahi-Berk a 50°C.....	58

Lista de Tabelas

Tabela 1. Composição química média do abacaxi.....	14
Tabela 2. Codificações utilizadas para as amostras naturais.....	35
Tabela 3. Planejamento experimental 2 ³ utilizado nos testes para avaliar as melhores condições de hidrólise da pectina.	36
Tabela 4. Codificações utilizadas para as amostras despectinizadas.	37
Tabela 5. Composição físico-química da polpa de abacaxi.	40
Tabela 6. Concentração de pectina obtida para os ensaios do planejamento experimental utilizado nos testes preliminares.....	41
Tabela 7. Resultados obtidos na análise de variância (ANOVA).....	42
Tabela 8. Parâmetros do modelo de Mizrahi-Berk para a amostra AN1do suco de abacaxi. .	44
Tabela 9. Parâmetros do modelo Lei da potência para a amostra AN1do suco de abacaxi. ...	45
Tabela 10. Parâmetros do modelo de Casson para a amostra AN1 do suco de abacaxi.	45
Tabela 11. Parâmetros do modelo de Mizrahi-Berk para a amostra AD1 do suco de abacaxi.	46
Tabela 12. Parâmetros do modelo Lei da potência para a amostra AD1 do suco de abacaxi.	47
Tabela 13. Parâmetros do modelo de Casson para a amostra AD1 do suco de abacaxi.	47
Tabela 14. Valores do índice de comportamento calculados pelo ajuste do modelo de Mizrahi-Berk nas quatro temperaturas utilizadas.	48
Tabela 15. Influência da temperatura sobre a viscosidade aparente das amostras AN1 e AD1 a uma taxa de deformação de 103s ⁻¹	51
Tabela 16. Valores da energia de ativação para as amostras naturais e despectinizadas.....	53
Tabela 17. Viscosidade aparente das amostras do suco de abacaxi com diferentes tamanhos de partícula a 25°C e 103s ⁻¹	56
Tabela 18. Percentual de redução da viscosidade das amostras do suco de abacaxi a uma taxa de deformação de 103s ⁻¹ e 10°C.....	59

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	12
2.1 Geral	12
2.2 Específicos	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Abacaxi (Ananas comosus (L.) Merr.)	13
3.2 Reologia	16
3.2.1 A reologia na indústria de alimentos	17
3.2.2 Classificação dos fluidos	19
3.2.3 Tipos de ensaios utilizados na avaliação do comportamento reológico	23
3.2.4 Suspensões	24
3.2.5 Reologia das suspensões	25
3.2.6 Distribuição do tamanho das partículas	26
3.2.7 Influência da temperatura	27
3.3 Tratamento enzimático	28
4. MATERIAL E MÉTODOS	33
4.1 Matéria ó prima	33
4.2 Métodos	33
4.2.1 Extração da polpa	33
4.2.2 Caracterização físico-química da matéria-prima	34
4.2.3 Preparação das amostras	35
4.2.4 Tratamento enzimático	36
4.2.5 Medidas reológicas	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1 Caracterização físico-química da polpa de abacaxi	40
5.2 Tratamento enzimático	41
5.3 Comportamento reológico	44
5.3.1 Efeito da temperatura	49
5.3.2 Efeito do tamanho de partículas	55
5.3.3 Efeito do tratamento enzimático	58
6. CONCLUSÕES	61
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
ANEXOS	68

1. INTRODUÇÃO

A fruticultura é a quarta principal atividade econômica da Amazônia, depois do minério de ferro, da madeira e da pecuária. Do ponto de vista social, entretanto, é a atividade que apresenta o maior potencial de distribuição de renda para a população, por envolver milhares de pequenos produtores, além das indústrias processadoras (ADA, 2005).

O arranjo produtivo de frutas da Amazônia é um dos mais dinâmicos quanto às possibilidades de desenvolvimento na forma de sistemas agroflorestais sustentáveis. Há um leque de 15 tipos de frutas tropicais (regionais e exóticas) sendo produzidas e beneficiadas na Amazônia. As frutas exóticas de expressão são o abacaxi, maracujá, acerola e graviola. As frutas da Amazônia têm sabor diferenciado por natureza e as de maior destaque comercial são o açaí, cupuaçu, bacuri, taperebá, abacaxi e camu-camu (ADA, 2005).

O abacaxi (*Ananas comosus* L.) é uma fruta muito apreciada em todos os países tropicais. Sua polpa suculenta, saborosa e ligeiramente ácida é muito refrescante. Ao lado das qualidades sensoriais que o distinguem universalmente, há o seu valor dietético, comparado aos das melhores frutas tropicais (SOLER, 1993).

Durante o processamento, armazenamento, comercialização e consumo, alimentos fluidos apresentam diferentes concentrações e estão sujeitos a diversas temperaturas. O conhecimento do comportamento reológico de sucos de frutas é fundamental em engenharia de processos e equipamentos. A definição de modelos adequados à descrição do escoamento é necessária ao projeto de tubulações e de bombas e aos sistemas de agitação e de mistura. O efeito da temperatura e da concentração sobre o comportamento reológico precisa ser conhecido para o entendimento e dimensionamento de operações unitárias tais como tratamento térmico e concentração (SILVA; GUIMARÃES; GASPARETTO, 2005). Essas características também auxiliam no controle de qualidade, desenvolvimento de novos produtos e aceitabilidade por parte do consumidor (QUEIROZ; VIDAL; GASPARETTO, 1996).

Nesse sentido, o conhecimento das características das propriedades reológicas do suco de abacaxi, bem como dos fatores que exercem influência sobre a mesma, surgem como ferramentas importantes para suprir a necessidade de dados a respeito desses parâmetros, auxiliando a avaliação da estabilidade das polpas e os processos de transporte desse tipo de fluido em nível industrial.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência da temperatura e do tamanho de partículas, sobre o comportamento reológico, em estado estacionário, do suco de abacaxi com e sem tratamento pectinolítico (enzimático).

2.2 Específicos

- Caracterizar o suco de abacaxi, quanto ao seu comportamento reológico em estado estacionário;
- Avaliar o ajuste de modelos reológicos estacionários na predição do comportamento do suco de abacaxi;
- Verificar a influência do tratamento pectinolítico (enzimático), sobre o comportamento reológico do suco utilizado.
- Avaliar a influência da variação da temperatura e do tamanho de partículas sobre o comportamento reológico do suco de abacaxi.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Abacaxi (*Ananas comosus* (L.) Merr.)

O abacaxi é uma fruta bastante consumida tanto ão natural, como industrializada, apresentando características que fazem com que o mesmo seja bastante utilizado na produção de polpas, compotas, doces cristalizados, geléias, sucos (natural, concentrado e em conserva), sorvetes, cremes, gelatinas e pudins. No Brasil, faz-se também uma bebida chamada aluá, bastante conhecida e apreciada no Norte e Nordeste, que é feita deixando as cascas do abacaxi imersas em água por alguns dias, até que se processe sua fermentação (SILVA, 2001).

O abacaxi é a oitava fruta mais produzida no mundo, sendo a sétima entre as produzidas no Brasil. É uma fruta de grande importância para exportação em conserva e para produção de sucos. O Brasil é o maior produtor de abacaxi da América do Sul, e o terceiro maior do mundo, produzindo aproximadamente 1.433.710 toneladas do fruto no ano de 2004. O Estado do Pará ocupa uma posição de destaque, sendo o segundo maior produtor de abacaxi do Brasil, produzindo em 2004 aproximadamente 22% da produção nacional, o que corresponde a aproximadamente 315.428 toneladas (SAGRI - PA, 2004).

A cultivar ãPérola é muito apreciada no mercado interno graças a sua polpa suculenta e saborosa, considerada insuperável para o consumo ao natural, fazendo com que os frutos tenham grande potencial de comercialização internacional, pois também são muito apreciados no Mercosul e Europa (SOUTO, 2004). A Figura 1 mostra o abacaxi pérola.



Figura 1. Foto do abacaxi ãPérola.

A composição química do abacaxi varia muito de acordo com a época em que é produzido. Apesar de ser produzido durante todo o ano, a safra ocorre no período do verão onde gera as frutas com maior teor de açúcares e menor acidez (FRANCO, 1989). A Tabela 1 apresenta a composição química média encontrada para o abacaxi.

Tabela 1. Composição química média do abacaxi.

Componentes	Quantidade
Umidade (%)	86,3
Proteínas (g/100g)	0,9
Lipídeos (g/100g)	0,1
Cinzas (g/100g)	0,4
Carboidratos (g/100g)	12,3
Fibra alimentar (g/100g)	1,0
Cálcio (mg/100g)	22

Fonte: Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO) - UNICAMP (2006)

O valor nutritivo do abacaxi se resume, praticamente, ao seu valor energético, devido a sua composição de açúcares (cerca de 15%). Os teores de proteína e de matéria graxa são inferiores a 0,5%. Possui em sua composição ferro, potássio, cálcio, as vitaminas A, B₁, B₂, fibras, além de vários compostos orgânicos (MEDINA et al., 1978). Sua contribuição em vitamina C é pequena se comparada a outras fontes, como a laranja e a acerola, não havendo praticamente nenhum outro nutriente em quantidade significativa. Merece destaque, todavia, o fato de que o abacaxi, pela sua atividade proteolítica, se constitui em coadjuvante da digestão dos alimentos, ao mesmo tempo é matéria-prima para a extração da enzima bromelina, de larga aplicação na indústria de alimentos. Quanto à composição química, apresenta sólidos solúveis totais variando de 10,8 a 17,5°Brix e acidez total titulável de 0,6 a 1,62 % expresso em ácido cítrico (ITAL, 1999).

A maior parte da exportação brasileira de abacaxi se dá na forma de fruta fresca, exigindo cuidados especiais na fase de colheita, pós-colheita e transporte, o qual deve ser realizado sob refrigeração. Os principais produtos da industrialização do abacaxi são a fruta em calda e o suco, tendo o segundo um maior destaque. O Estado do Pará destaca-se no beneficiamento do fruto quando se trata do suco concentrado, contribuindo com 76,8% das exportações brasileiras de suco concentrado de abacaxi em 2001 (AMIM; BOULHOSA, 2002). A Figura 2 apresenta o fluxograma do processamento do suco de abacaxi.

São grandes as expectativas do segmento de suco de abacaxi na área de modernização de equipamentos, buscando a otimização na linha de processamento, no enquadramento e melhoramento da qualidade do produto, bem como na sua apresentação (ALVARENGA, 2001).

O abacaxi tem sido alvo de inúmeros estudos, como os desenvolvidos por Pelegrini, Vidal, Gasparetto (2000), avaliando a viscosidade aparente de sua polpa; Queiroz, Vidal, Gasparetto (2000), que estudaram a influência dos sólidos insolúveis suspensos sobre o comportamento reológico dos sucos de abacaxi naturais e despectinizados; Guimarães; Gasparetto (2000) que avaliaram a influência do sistema de medidas sobre o comportamento reológico da polpa de abacaxi.

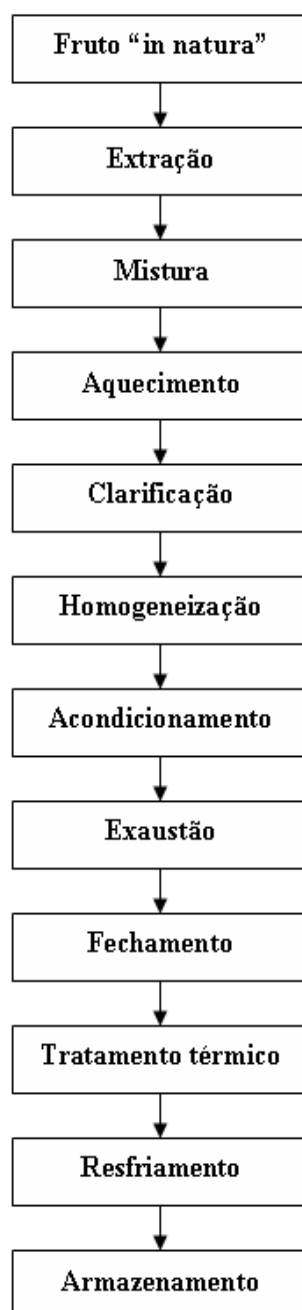


Figura 2. Fluxograma do processamento do suco de abacaxi. Fonte: ZAMBIAZI, MENDONÇA, GRANADA (2004).

3.2 Reologia

A reologia pode ser estabelecida como a ciência que estuda a deformação e o escoamento de materiais, ou seja, o modo como os materiais respondem à aplicação de uma tensão ou deformação (originadas por forças externas). Esses materiais podem ser classificados em sólidos (associados à deformação do material) ou líquidos (associados com o escoamento da matéria líquida).

Muitas das teorias da reologia se fundamentam em modelos idealizados, baseados em equações diferenciais de primeira ordem, cujo conceito admite que as constantes nestas equações não mudam quando ocorrem alterações nas suas variáveis. Existem, entretanto, várias exceções aos modelos ideais, denominados de sistemas anômalos, que são tratados individual, matemática ou experimentalmente, sendo inclusive mais comuns que os sistemas ideais.

Embora a teoria da reologia, qualitativa ou quantitativa, trate o fenômeno da deformação como reversível, a irreversibilidade está muitas vezes presente. As propriedades reológicas de uma substância, por vezes, mostram-se dependentes do tempo ou variam com a continuidade da deformação. Essas variações ocorrem seja o fenômeno reversível ou irreversível (MACHADO, 2002).

O comportamento reológico dos materiais de natureza biológica é muito variado e complexo. Além deste fator, estes podem ter comportamentos diferentes frente às condições a que forem submetidos, quer ao nível das tensões e da taxa de deformação em cisalhamento, quer em função do tempo e temperatura. Desta forma, é impossível descrever o comportamento dos materiais por uma lei constitutiva que leve em conta todas as variáveis (tensão de cisalhamento (), taxa de deformação (), tempo (t), temperatura (T), etc.) e aplicável em todos os casos (MORAIS; CASTRO; DIOGO, 2001).

No segmento de alimentos, a reologia é uma área de conhecimento que vem desempenhando um papel cada vez mais importante, basicamente sob dois pontos de vista. Do ponto de vista fundamental, de forma a permitir uma melhor compreensão do comportamento mecânico dos produtos alimentares, nem sempre fácil de prever e interpretar, em consequência da complexidade da sua composição e dos processamentos a que são submetidos.

Do ponto de vista prático, devido às suas implicações tecnológicas, a reologia é utilizada, por exemplo, no melhoramento e controle das propriedades funcionais de produtos convencionais e no desenvolvimento de novos produtos. Para um produto alimentar ser aceito pelos consumidores, cada vez mais exigentes, terá de reunir determinadas propriedades

mecânicas/sensoriais. Estas são determinantes, por exemplo, na aceitabilidade de vários produtos alimentares como os snacks, pudins, cremes, sopas, iogurtes, congelados, chocolates, etc., onde a avaliação objetiva dessas características está relacionada a reologia.

Com o aumento da competitividade internacional, vários tipos de sistemas proteína/polissacarídeo vêm sendo utilizados na indústria de alimentos de forma inovadora, uma vez que, são estes dois tipos de biopolímeros os responsáveis pela estrutura dos alimentos, como resultado das interações que estabelecem entre si e com os outros componentes do sistema. Contudo, a natureza exata das interações nestes sistemas é, ainda hoje, objeto de debate; neles a reologia vem desempenhar um papel determinante (CASTRO, 2003).

No Brasil, há escassez de dados sobre propriedades reológicas dos sucos, polpas e outros concentrados de frutas brasileiras. A matéria-prima brasileira apresenta características diferentes daquela produzida em outras partes do mundo, principalmente no que diz respeito aos teores de polpa e de açúcares, que vão influenciar diretamente no teor de sólidos solúveis e insolúveis. A crescente necessidade e procura dos parâmetros reológicos para os diversos fluidos manipulados nas indústrias de processamento está ligada também à grande importância econômica que estes fluidos e equipamentos de manipulação representam (VIDAL, 1997).

3.2.1 A reologia na indústria de alimentos

Na indústria de alimentos, a reologia pode desempenhar um papel fundamental em quatro áreas: controle de qualidade, controle de processo e concepção das linhas de produção e desenvolvimento de novos produtos (CASTRO, 2003).

I. A reologia no controle de qualidade

No controle de qualidade, por exemplo, a caracterização de farinhas de trigo, é realizada através de ensaios reológicos e o resultado direto destas análises determina o destino da farinha, permitindo a sua classificação em ôfarinhas fortes, utilizadas em panificação, e ôfarinhas fracas, utilizadas na produção de biscoitos. O conhecimento das propriedades reológicas das emulsões é também de extrema importância, uma vez que, a maioria dos atributos sensoriais e o tempo de vida destes produtos, estão muitas vezes relacionados com o seu comportamento reológico.

Durante o processamento, os ingredientes alimentares são, muitas vezes expostos a vários tipos de tensão, provocados pelo escoamento através de bombas, permutadores de

calor, filtros e outros. Nos últimos 10 anos, tem surgido na literatura, até então praticamente inexistentes, estudos em que foram demonstradas que as condições de processamento têm um efeito decisivo na microestrutura e propriedades reológicas de sistemas alimentares (CASTRO, 2003).

No caso de sistemas mistos de biopolímeros que apresentam separação de fase, demonstrou-se que uma inversão de fase na microestrutura pode ser induzida quando estes sistemas são submetidos a escoamento em cisalhamento durante grande parte do processo de formação do gel (RAYMUNDO; EMPIS; SOUSA, 1998).

II. A reologia no controle de processo e na concepção das linhas de produção

No controle de processo, a medição *on line*, de propriedades como, por exemplo, a viscosidade, pode ser realizada em contínuo num determinado ponto da linha de produção, o que permite um controle mais fácil das características de determinado produto. A inserção de um viscosímetro no circuito de produção, funcionando como uma sonda, pode permitir o desvio automático e a retirada do produto que não esteja de acordo com as especificações, poupando ciclos posteriores de processamento de um produto defeituoso, otimizando assim a linha de produção.

Nos congelados, por exemplo, as condições finais de produção assumem um papel determinante, uma vez que, as condições térmicas e mecânicas determinam a distribuição do tamanho dos cristais. Situação semelhante é também verificada para produtos tipo a margarina (CASTRO, 2003).

III. A reologia no desenvolvimento de produtos

Fatores como aroma, sabor, cor e a textura final dos alimentos são fatores decisivos na sua aceitabilidade por parte dos consumidores.

No desenvolvimento de produtos, quando propriedades como a textura e a consistência são características fundamentais no alimento, há uma extensão da reologia ó a psicorreologia, que estabelece as relações entre os resultados da avaliação sensorial e das medições instrumentais destes parâmetros. Esta avaliação permite progredir no desenvolvimento do produto, sem recorrer a um painel sensorial, com a conseqüente economia de tempo e custos. Por outro lado, a quantificação objetiva destas propriedades facilita a utilização de ferramentas estatísticas na otimização de formulações e de níveis de processamento, como por exemplo, a Metodologia das Superfícies de Resposta (RSM) (CASTRO, 2003).

3.2.2 Classificação dos fluidos

Em função do comportamento reológico viscoso, os fluidos podem ser classificados em Newtonianos e não-Newtonianos, como mostra a Figura 3.

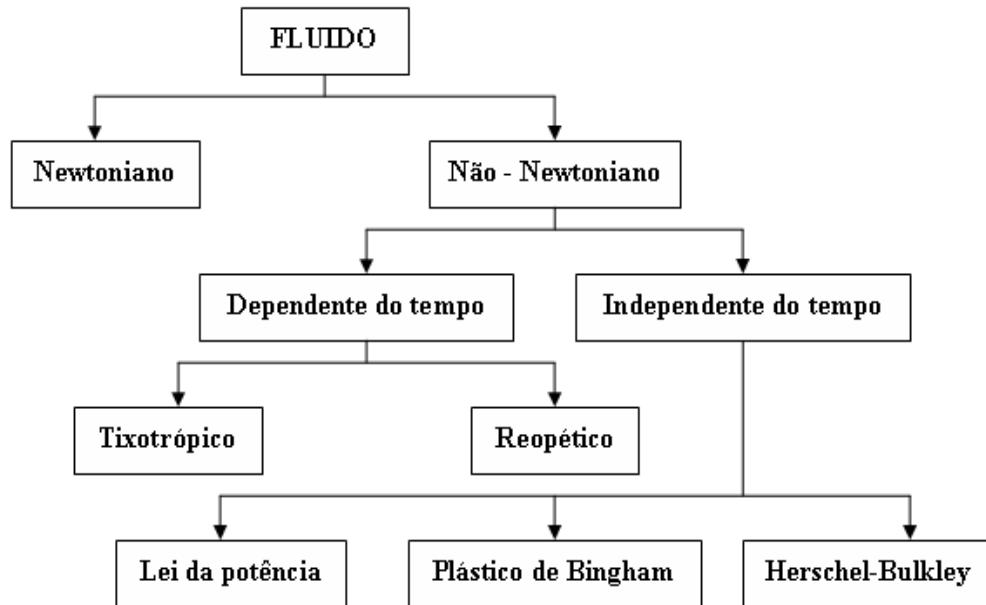


Figura 3. Classificação do comportamento reológico dos fluidos. Fonte: SATO, 2005.

Os fluidos Newtonianos apresentam uma relação linear entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento, como mostra a equação de Newton (Equação 1), ou seja, a viscosidade mantém-se constante com a variação na taxa de deformação (Figura 2), sendo a sua inclinação igual à viscosidade única do fluido. Nos fluidos Newtonianos, a viscosidade só é influenciada pela temperatura e pela pressão.

Outra maneira de analisar o comportamento dos fluidos Newtonianos é através da relação entre viscosidade e a taxa de deformação, também conhecida como curva de viscosidade. Para o fluido newtoniano, esta relação é uma reta paralela ao eixo das taxas de deformação, uma vez que a sua viscosidade é constante. Como exemplos desses fluidos, pode-se citar os óleos e soluções de polímeros (FERREIRA et al., 2005).

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

Onde: τ = Tensão de cisalhamento; η = Viscosidade do fluido; $\dot{\gamma}$ = taxa de deformação.

Ao contrário dos fluidos newtonianos, os fluidos não-newtonianos não apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, isto é, os valores da

viscosidade mudarão com a variação dos valores da taxa de deformação (Equação 2). Esses valores de viscosidade são considerados como uma viscosidade aparente, isto é, a viscosidade que o fluido teria se fosse newtoniano, naquela condição de fluxo. Esta viscosidade só é válida para uma determinada taxa de deformação correspondente. A viscosidade aparente pode aumentar ou diminuir, de acordo com as características de cada fluido (FERREIRA et al., 2005).

$$\eta_{ap} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2)$$

Onde: η_{ap} = viscosidade aparente (Pa.s); τ = tensão de cisalhamento (Pa); $\dot{\gamma}$ = taxa de deformação (s^{-1})

Para alguns fluidos, os valores de viscosidade diminuem com o aumento da taxa de deformação; nesse caso, diz-se que o material possui comportamento pseudoplástico. Como exemplo, têm-se alguns tipos de emulsões e vários tipos de suspensões. Entre as várias causas para esse comportamento, têm-se para o caso de um sistema agregado, que a diminuição da quantidade de líquido retido pelos agregados, devido à quebra dos mesmos, através da agitação, provoca uma diminuição da viscosidade (FERREIRA et al., 2005).

Os fluidos não-Newtonianos podem ainda ser classificados como dependentes ou independentes do tempo. No primeiro caso, a viscosidade aparente do fluido varia tanto com a taxa de deformação quanto com a duração de sua aplicação (tempo), podendo os fluidos serem classificados como tixotrópicos ou reopéticos. A diminuição da viscosidade aparente com o tempo de cisalhamento, a uma condição constante de temperatura e taxa de deformação, caracteriza um material tixotrópico, enquanto que fluidos que têm a sua viscosidade aparente aumentada com o tempo são denominados de reopéticos. Grande parte dos fluidos alimentícios como pastas de frutas e vegetais, *ketchup*, mostarda e comida de bebê apresentam comportamento tixotrópico (BARBOSA-CÁNOVAS; IBARZ; PELEG, 1993).

Nos fluidos independentes do tempo, a viscosidade aparente é somente função da taxa de deformação, podendo apresentar ou não tensão residual (τ_0) para o início do escoamento (Figura 4).

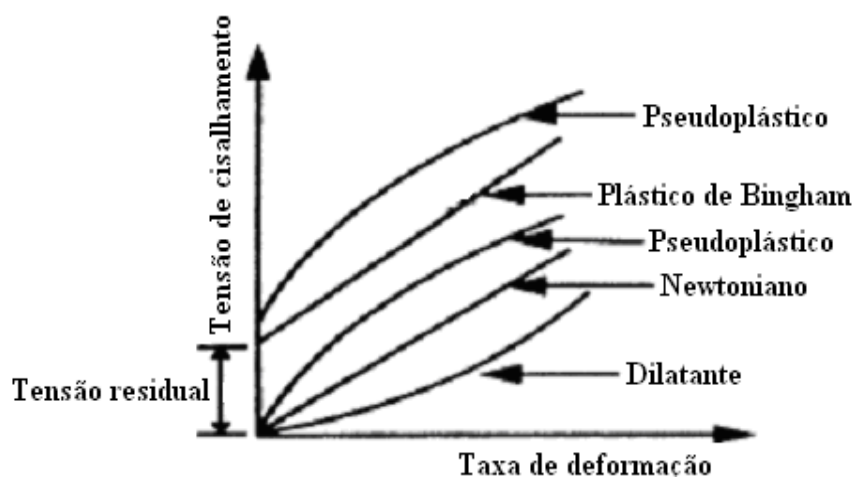


Figura 4. Curvas de escoamento típicas de fluidos. Fonte: FERREIRA et al., 2005.

A tensão residual ou tensão inicial de cisalhamento (τ_0) pode ser entendida como uma mudança súbita no comportamento de um fluido ou pasta para um estado menos resistente, sendo equivalente a tensão de cisalhamento mínima necessária para que um fluido comece a escoar. Para os alimentos, como a escala de tempo dos processos é, em geral, inferior ao tempo necessário para o escoamento, τ_0 torna-se um importante parâmetro reológico (BARNES, 1999).

A tensão residual pode ser utilizada para estimar a espessura do revestimento de superfícies, como a de uma cobertura de sorvete, avaliar a força necessária para que um fluido saia da embalagem, impedir a sedimentação de partículas suspensas, o que poderia ser fator determinante para a vida de prateleira de um produto alimentício ou evitar o entupimento de tubulações durante o processamento, entre outros. Como exemplos de alimentos com tensão residual, pode-se citar chocolate fundido, catchup, maionese, creme de leite, polpas de frutas, entre outros.

Historicamente, a presença da tensão residual sempre foi observada em curvas de tensão em função da taxa de deformação. Todavia, na representação logarítmica da viscosidade em função da tensão aplicada, esta pode ser muito melhor ilustrada, sendo observada quando a viscosidade cresce infinitamente à medida que a tensão de cisalhamento diminui. Esta transição indica que abaixo desta tensão crítica, o material em questão apresenta o comportamento de um sólido, enquanto que acima desta tensão passa a se comportar como um líquido (SATO, 2005).

O modelo a ser utilizado na descrição do comportamento reológico depende do tipo de material, que condiciona os pormenores da curva de viscosidade e da gama de velocidades de

deformação que é possível abranger com o aparelho de medida/sistema sensor. No entanto, os parâmetros envolvidos nesses modelos poderão servir de base à comparação de diferentes materiais descritos pela mesma equação (CASTRO, 2003).

Como primeira abordagem recorre-se geralmente à lei da potência ou Power-Law (Equação 3). Neste caso a viscosidade aparente do fluido diminui à medida que aumenta a tensão de cisalhamento. Se na equação 3, $n > 1$ o fluido é considerado dilatante, o qual corresponde ao fenômeno inverso da pseudoplasticidade, pois a viscosidade do fluido aumenta à medida que aumenta a taxa de deformação. Se $n < 1$ o fluido é considerado pseudoplástico.

$$\tau = K \times \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

Onde: τ = Tensão de cisalhamento (Pa); K = índice de consistência (Pa.s^n); n = índice de comportamento (adimensional); $\dot{\gamma}$ = taxa de deformação (s^{-1}).

De um modo geral, o modelo Herschel-Bulkley (Equação 4) pode ser utilizado para descrever o comportamento de diversos tipos de fluidos, pois engloba todos os modelos representados na Figura 2. Esse modelo é uma forma modificada da Lei da Potência (RAO; COOLEY, 1982), ou seja, o que diferencia um do outro é a presença ou ausência do termo da tensão de cisalhamento inicial.

$$\tau = \tau_0 + K \times \dot{\gamma}^n \quad (4)$$

Onde: τ_0 = tensão residual (Pa); K = índice de consistência (Pa.s^n); n = índice de comportamento de escoamento.

O modelo de Casson (Equação 5) tem sido usado para alimentos, particularmente para estimar a tensão inicial (K_{0C}). Neste modelo, a curva da tensão de cisalhamento versus a taxa de deformação pode ser transformada em uma linha reta pela plotagem da raiz quadrada da tensão de cisalhamento versus a raiz quadrada da taxa de deformação. O chocolate é um exemplo notável deste tipo de fluido (SHARMA; MULVANEY; RIZVI, 2000).

$$\tau^{1/2} = K_{0C} + K_C \times \dot{\gamma}^{1/2} \quad (5)$$

Onde: τ = tensão de cisalhamento (Pa); $\dot{\gamma}$ = taxa de deformação (s^{-1}); K_{0C} = tensão inicial; K_C = índice de consistência (Pa.s).

O modelo reológico proposto por Mizrahi-Berk é o que melhor tem se ajustado à maioria dos reogramas das polpas, sucos e purês de frutas, já que os autores o desenvolveram

baseando-se no modelo de uma suspensão de partículas interagindo em um solvente pseudoplástico, que se resume na Equação 6.

$$\tau^{1/2} = K_{0M} + K_M \times \dot{\gamma}^{nM} \quad (6)$$

Onde: τ = tensão de cisalhamento (Pa); $\dot{\gamma}$ = taxa de deformação (s^{-1}); K_M = índice de consistência ($Pa.s^n$); nM = índice de comportamento do fluido; K_{0M} = raiz quadrada da tensão inicial de cisalhamento.

A determinação experimental dessa tensão inicial é muito difícil de ser obtida em equipamentos reométricos simples e geralmente esse valor é apenas o resultado de um ajuste do modelo aos pontos experimentais. Dos parâmetros reológicos presentes na equação acima, tanto a tensão inicial de cisalhamento (K_{0M}) quanto os índices de consistência (K_M) e comportamento (nM) são afetados pelas propriedades físicas das partículas em suspensão presentes nos derivados de frutas (PELEGRINE; VIDAL; GASPARETTO, 2000).

3.2.3 Tipos de ensaios utilizados na avaliação do comportamento reológico

São fundamentalmente três os testes reológicos utilizados na avaliação do comportamento reológico: testes estacionários, testes oscilatórios e testes estáticos (CASTRO, 2003).

I. Testes estacionários

Os testes em regime estacionário consistem na aplicação de um gradiente de tensão ou velocidade de corte, linear ou logarítmico, unidirecional relativamente à amostra em estudo.

Este tipo de ensaio é utilizado usualmente para a determinação da viscosidade aparente, e conseqüentemente para a determinação das curvas de escoamento (viscosidade em função da taxa de deformação), permitindo uma avaliação da influência de diversos fatores (temperatura, concentração, presença e tamanho de partículas em suspensão) sobre a viscosidade (SATO, 2005).

II. Testes oscilatórios

A essência da análise oscilatória consiste em testar a amostra de uma forma não destrutiva. Neste tipo de ensaio é aplicada à amostra uma tensão (ou deformação), que é uma função sinusoidal do tempo e registra-se a deformação (ou tensão) resultante (CASTRO, 2003).

III. Testes estáticos

Enquanto nos testes oscilatórios a tensão aplicada varia como uma onda sinusoidal, nos testes estáticos, ou ensaios de fluência-recuperação, a amostra é submetida a uma tensão constante durante um período prolongado, permitindo a análise dos elementos estruturais com tempos de resposta mais longos.

Desta forma, nestes ensaios é aplicada instantaneamente, à amostra em estudo, uma tensão constante durante um período de tempo S , durante o qual a deformação sofrida pela amostra é registrada (curva de fluência). Ao tempo S , a tensão é instantaneamente removida, mas a variação da deformação continua a ser registrada (curva de recuperação) (CASTRO, 2003).

3.2.4 Suspensões

Suspensões são sistemas multifásicos, nos quais a fase sólida é dispersa em um líquido. Estes sistemas podem ser diluídos sem interação entre as partículas, estabilizados, floculados e estruturados, parcialmente estáveis ou sedimentáveis, como mostram as ilustrações da Figura 5. A formação do tipo de estrutura em cada material vai depender da composição química das duas fases, tamanho e formato das partículas, efeitos de superfície e/ou presença de aditivos (FERGUSON; KEMBLOWSKI, 1991).

É possível observar exemplos de suspensões em produtos das mais diversas áreas industriais. Cimento, tinta, argila, sangue, além de diversos produtos das áreas alimentícias, como as polpas de frutas, são produtos que podem ser considerados suspensões.

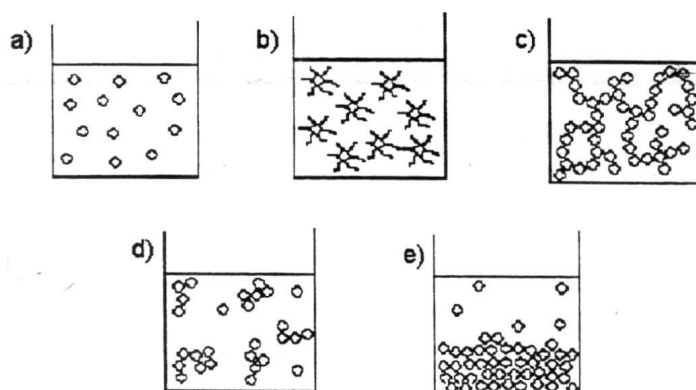


Figura 5. Estrutura das partículas em suspensão.(a) diluídas sem interação entre partículas; (b) estabilizadas; (c) floculadas; (d) parcialmente estáveis com alguma estrutura formada; (e) sedimentadas. Fonte: SATO (2005).

3.2.5 Reologia das suspensões

O estudo da reologia das suspensões é de grande importância em uma ampla faixa de aplicações industriais. Suspensões concentradas são amplamente encontradas na indústria alimentícia, como no caso de chocolates, sucos de frutas, purês, ãketchup e produtos de laticínios como iogurtes (RAO, 1977).

As características de escoamento das suspensões podem ser definidas tanto pela fase contínua, como pela fase particulada, além da influência de uma fase na outra, pois mudanças na estrutura formada entre as partículas da fase dispersa também afetam o comportamento do fluido (FERGUSON; KEMBLOWSKI, 1991).

Sucos, purês e concentrados de frutas (incluindo os de tomate) formam um grupo de produtos de características similares. Estão constituídos por uma fase dispersante, o soro, na qual se encontram açúcares, ácidos, pectinas solúveis e proteínas. A outra fase é a dispersa, composta por partículas de diferentes formas e volume, procedentes dos tecidos das frutas (JIMENES; DURAN, 1979).

A viscosidade aparente de polpas de frutas é influenciada por inúmeros fatores como a quantidade de sólidos solúveis e insolúveis, distribuição de tamanho de partículas, formato das partículas e variáveis de processo. Uma concentração muito baixa da fase dispersa, faz com que a fase contínua determine o caráter do fluido, resultando em um comportamento Newtoniano. Por outro lado, sólidos em grandes quantidades podem provocar um grande aumento na viscosidade de suspensões (FERGUSON; KEMBLOWSKI, 1991).

Segundo Servais, Jones, Roberts (2002), um pequeno aumento na quantidade de sólidos em uma suspensão de 50% (em volume) de concentração de partículas esféricas que não interagem (entre si nem com o sistema), pode duplicar a viscosidade do fluido. Polpas de frutas como tomate, manga, acerola, cajá, graviola, melão e morango foram caracterizadas na literatura como sendo fluidos pseudoplásticos com tensão inicial (SHARMA et al., 1996).

A distribuição dos tamanhos de partículas também é um parâmetro que influencia bastante a viscosidade. É possível reduzir até 50 vezes a viscosidade aparente mantendo a mesma quantidade de sólidos, somente com alterações na distribuição do tamanho de partículas. A adição controlada de partículas de tamanhos extremos da distribuição pode ser empregada para aumentar ou reduzir a viscosidade do sistema, o que é conhecido como *efeito Farris* (BARNES; HUTTON; WALTERS, 1989).

Sucos clarificados e despectinizados apresentam comportamento newtoniano, ao passo que os sucos concentrados e as polpas não seguem a lei da viscosidade de Newton (MIZRAHI; BERK, 1971). Segundo Holdsworth (1971), a maioria dos alimentos fluidos

derivados de frutas apresenta comportamento pseudoplástico, onde a viscosidade aparente decresce com o aumento da taxa de deformação, em função da orientação das moléculas na direção do escoamento e a quebra de agregados, que tornam a resistência ao movimento cada vez menor.

3.2.6 Distribuição do tamanho das partículas

A distribuição do tamanho das partículas consiste em expressar a frequência da quantidade de partículas sólidas em cada faixa de tamanho, que normalmente é dada em fração mássica ou volumétrica em função dos diferentes diâmetros de partículas encontrados em uma amostra. As características das partículas e a descrição de sua distribuição de tamanho são utilizadas para caracterizar as propriedades de materiais particulados como pós, suspensões, emulsões, aglomeração, grau de dispersão, granulação, sedimentação, turbidez, entre outras características.

A lei de Stokes rege a cinética de sedimentação das partículas em função do seu tamanho. Stokes deduziu a força de arraste sobre uma partícula esférica (suficientemente pequena para que o regime seja laminar), considerando que essa força ocorre inteiramente devido à resistência viscosa (LIMA; LUZ, 2001). A Equação 7 mostra a expressão da lei de Stokes.

$$v = \frac{d^2 \times g \times (\rho_s - \rho_f)}{18 \times \eta} \quad (7)$$

Onde: v = velocidade relativa da partícula; d = diâmetro da partícula; g = aceleração da gravidade; ρ_s = densidade do sólido; ρ_f = densidade do fluido; η = viscosidade dinâmica do fluido.

De um modo geral, uma suspensão que apresenta um único tamanho de partículas predominante é classificada como uma distribuição monomodal de partículas, enquanto que uma suspensão bidispersa ou com distribuição bimodal apresenta dois tamanhos predominantes de partículas. Amostras com mais tamanhos predominantes de partículas são denominadas de suspensões polidispersas (SATO, 2005).

Freitas (2002) relacionou as partículas de polpas de frutas à pectina presente no meio, uma vez que a remoção das partículas em suspensão levou a um decréscimo da quantidade de pectina das amostras. A presença e tamanho das partículas em suspensão dependem principalmente do tipo de processo utilizado na obtenção da polpa. O tamanho das partículas insolúveis dispersas, bem como a fração de pectina solúvel na fase líquida determinarão o tipo

de estrutura formada e a estabilidade das polpas de frutas, sendo fundamentais no estudo das condições de processo e vida de prateleira destes produtos.

Existem inúmeras maneiras de se representar o tamanho de uma partícula. Uma vez que a esfera é o único formato que pode ser representado por um único número, normalmente se relaciona as dimensões da partícula aos diâmetros de esferas de diferentes tamanhos. Assim, as dimensões de uma partícula podem ser expressas em termos do diâmetro da esfera equivalente de mesma área superficial, mesmo volume, mesma massa, etc.

Diversas metodologias são encontradas na literatura para a determinação de tamanho de partículas em alimentos, dentre as quais se destaca o peneiramento, a microscopia, difração a laser, fotometria de sedimentação, entre outras (VALENCIA et al., 2002). Entretanto é necessário observar que a utilização de diferentes técnicas de medida resultará em valores de diâmetros diferentes, uma vez que as dimensões das partículas são determinadas sob diferentes pontos de vista.

O peneiramento é uma técnica extremamente antiga e barata, sendo utilizada especialmente para a separação de partículas grandes. O tamanho das partículas retidas em cada peneira equivale à média entre a abertura da malha em que ficou retida e a imediatamente superior (SATO, 2005).

3.2.7 Influência da temperatura

A temperatura é um parâmetro relacionado com a energia interna da substância ou mistura. A experiência tem mostrado que a viscosidade de um líquido é altamente influenciada por mudanças de temperatura. Um acréscimo de 1°C na temperatura de um óleo mineral, por exemplo, reduz a sua viscosidade em 10% (MACHADO, 2002).

Tendo em vista que a temperatura muda consideravelmente durante muitas operações em um processo, é importante obter valores apropriados de viscosidade dentro do intervalo de temperaturas existente durante o processamento do produto em questão. Esta dependência da viscosidade com a temperatura obriga a um cuidado adicional, a fim de evitar flutuações de temperatura durante as medidas de viscosidade (SINGH; HELDMAN, 1997).

Um aumento da temperatura provoca uma redução na viscosidade dos líquidos, contudo causa um aumento na viscosidade dos gases. A viscosidade dos líquidos incompressíveis varia inversamente com a temperatura absoluta (MACHADO, 2002). O efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente pode ser descrito mediante uma equação análoga a de Arrhenius (Equação 8) (SILVA; GUIMARÃES; GASPARETTO, 2005).

$$\eta_{ap} = \eta_o \times \exp\left(\frac{E_{at}}{RT}\right) \quad (8)$$

Onde: η_A = viscosidade aparente (Pa.s); η_o = Constante (Pa.s); E_{at} = Energia de ativação para escoamento viscoso (kcal.g.mol⁻¹); R = Constante dos gases (1,987 x 10⁻³ kcal.g.mol⁻¹.K⁻¹); T = Temperatura absoluta (K).

A Equação (8) indica a tendência geral observada de uma diminuição da viscosidade aparente com o aumento da temperatura. De um modo geral, quanto maior for a energia de ativação, maior será o efeito da temperatura sobre a viscosidade (SILVA; GUIMARÃES; GASPARETTO, 2005).

3.3 Tratamento enzimático

No início da década de 30, as indústrias que comercializavam apenas frutas começaram também a produzir seus respectivos sucos. A produção industrial inicial apresentava baixos rendimentos, em consequência de dificuldades encontradas para realizar a etapa de filtração e para obter uma clarificação aceitável dos sucos (BHAT, 2000). O suco resultante das frutas despulpadas era rico em partículas insolúveis e em materiais suspensos constituídos, principalmente, por substâncias pécticas, polissacarídeos em geral (celulose, hemicelulose e o amido), proteínas, taninos, metais e microrganismos (KASHYAP et al., 2001).

As substâncias pécticas são polissacarídeos ácidos de elevado peso molecular, carregados negativamente, constituídos por unidades de ácido D-galacturônico e ocorrem praticamente em todas as plantas superiores, nas quais se encontram principalmente sob a forma de protopectinas na lamela média (sob a forma de pectato de cálcio e pectato de magnésio) e na membrana celular. Nos frutos, encontram-se nos espaços intercelulares, estando presentes em grande quantidade nos frutos verdes na forma de protopectinas. As substâncias pécticas podem ser classificadas em quatro tipos: protopectinas, ácidos pécticos, ácidos pectínicos e pectinas (JAYANI; SAXENA; GUPTA, 2005).

As pectinas são polímeros lineares essencialmente compostos de unidades de ácido D-galacturônico unidas por ligações do tipo α -1,4. As unidades de ácido galacturônico podem ter um grau de metilação importante no C₆. A presença de outras unidades de açúcares, tal como galactose, arabinose e rhamnose juntamente ao longo das cadeias de grupos de ácido galacturônico, tem reforçado a compreensão das propriedades das pectinas. Devido a essas propriedades, as pectinas são responsáveis pela turbidez e o aumento da viscosidade de sucos de frutas (BARROS, 2004). A Figura 6 mostra a estrutura da cadeia de pectina.

Genericamente, as pectinas são subdivididas em duas classes, uma com alto grau de metoxilação (>50%), HMP, e a outra com baixo grau de metoxilação (<50%), LMP, que pode também possuir grupos amida. Comercialmente, as pectinas com alto grau de metoxilação apresentam teores na faixa 55 a 75%, já nas de baixo grau de metoxilação, esses teores variam na faixa 15 a 45%. Quando amidadas, as pectinas de baixo teor em grupamentos metoxílicos apresentam composição em grupamentos amida na faixa 10 a 25% (BRANDÃO; ANDRADE, 1999).

Pectinas promovem o processo difícil de clarificação por causa de sua estrutura fibrosa. O amido também pode levar a dificuldades durante a clarificação e causar uma turbidez secundária em sucos, portanto, não deve estar presente em sucos clarificados (BARROS, 2002).

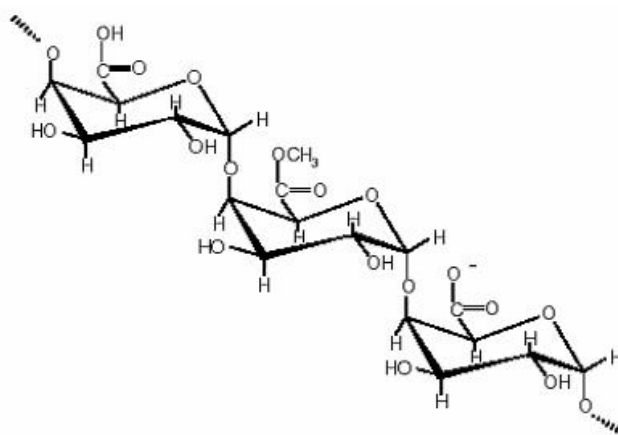


Figura 6. Estrutura química da cadeia de pectina. Fonte: BRANDÃO, ANDRADE (1999)

Dessa forma, tornou-se imprescindível à pesquisa sobre diferentes processos industriais que proporcionassem um melhor rendimento na produção de sucos. Segundo Petrus (1997), esses processos podem ser divididos em: físicos, químicos e bioquímicos. As pesquisas desenvolvidas sobre os processos bioquímicos indicaram a utilização de enzimas de maceração (pectinases, celulasas e hemicelulasas) durante o processo de industrialização, principalmente como pré-tratamento para sucos a serem clarificados por micro ou por ultrafiltração, pois o suco resultante tem uma quantidade mais baixa de pectinas, além de uma viscosidade menor (BALISCHI et al., 2002).

As enzimas pectinolíticas ou pectinases são grupos heterogêneos de enzimas que hidrolisam as substâncias pécticas presentes na maioria das plantas. As pectinases são amplamente distribuídas em plantas superiores e microrganismos (WHITAKER, 1990). A classificação desse tipo de enzima consiste basicamente em três grupos: as de-esterificadoras

(pectinesterases), depolimerases (Pectinases: hidrolases e lyases) e protopectinases (ALKORTA et al, 1998). A Figura 7 mostra a atuação de diferentes tipos de pectinases sobre as substâncias pécicas.

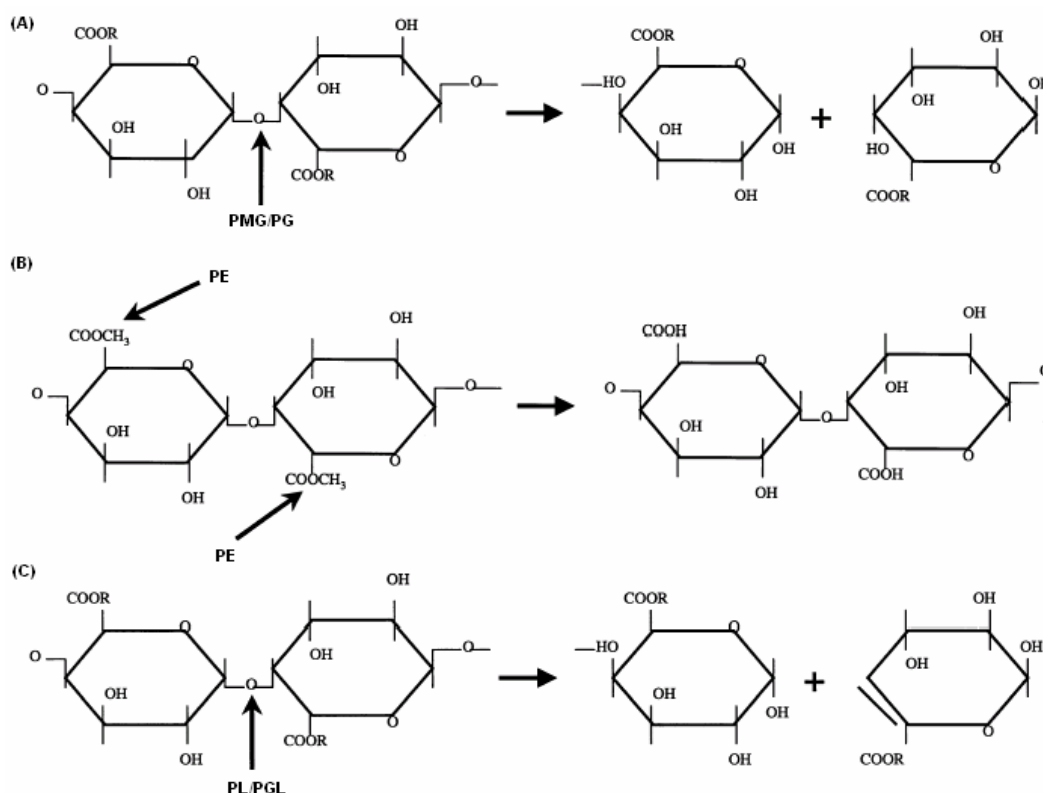


Figura 7. Atuação de diferentes tipos de pectinases sobre as substâncias pécicas. Fonte: GUMMADI, PANDA (2003)

A pectinesterase (PE) atua quebrando a ligação éster entre o grupo carboxila do ácido galacturônico e o grupo metila, liberando molécula desesterificada (ácido poligalacturônico); a pectina liase (PL) atua despolimerizando a molécula de pectina por mecanismo de trans-eliminação do hidrogênio, inserindo dupla ligação entre os carbonos 4 e 5 do ácido galacturônico, resultando numa diminuição significativa da viscosidade; a poligalacturonase (PG) catalisa a hidrólise da ligação glicosídica 1-4 entre os ácidos galacturônicos. As liases e as hidrolases recebem a denominação pectina liase ou pectato liase e polimetilgalacturonase ou poligalacturonase quando atuam na pectina altamente esterificada ou no ácido poligalacturônico, respectivamente (GOMES et al., 2006).

Huber (1983) descreve a atuação das enzimas pectinolíticas sobre a pectina, ou seja, a protopectina sofre hidrólise ácida ou ação da protopectinase, formando ácidos pectínicos, que por sua vez sofrem a eliminação do grupo metílico pela ação da pectinametilesterase (PME), formando metanol e pectinas com poucos grupos metílicos. Estas sofrem degradação pela

depolimerase, originando ácidos pécticos (poligalacturônico), que ao sofrer degradação pela poligalacturonase, forma ácido D-galacturônico e elementos minerais não-essenciais. É importante salientar que a poligalacturonase atua provocando a hidrólise glicosídica do ácido péctico. A Figura 8 mostra a estrutura dos ácidos pécticos.

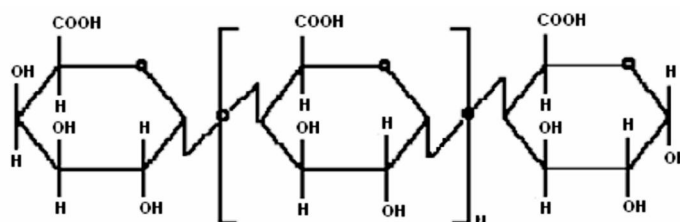


Figura 8. Estrutura química dos ácidos pécticos.

A hidrólise das ligações glicosídicas na protopectina por poligalacturonase (PG) é responsável pelo amaciamento que acompanha a solubilização de pectinas durante o amadurecimento dos frutos. Nos frutos imaturos há ausência de PG, havendo seu aparecimento próximo ao início do amadurecimento, indicando que ela esteja implicada na solubilização da pectina (HUBER, 1983).

JANSER (1997) relatou que o abacaxi tem quantidades maiores de hemicelulose e celulose que as cerejas, e que tem um índice elevado de galactomananas, que são polissacarídeos neutros com elevada absorção de água e formam soluções viscosas mesmo quando muito diluídos (BARROS; MENDES; PERES, 2004). A Figura 9 mostra a estrutura genérica das galactomananas.

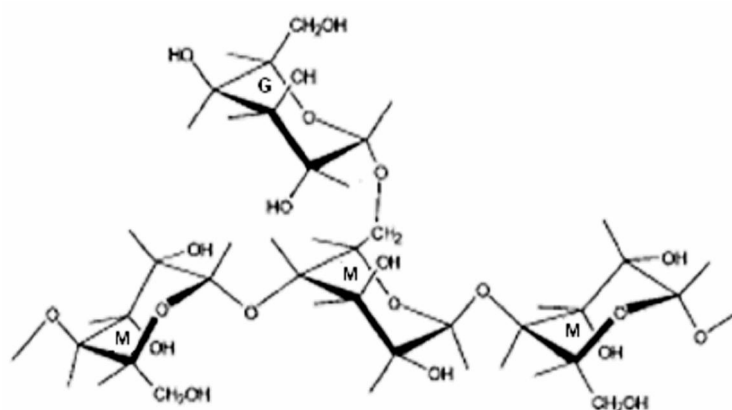


Figura 9. Estrutura das galactomananas ó galactose (G), manose (M). Fonte: MERCÊ et al., 2001.

Para a clarificação do suco de abacaxi é necessário usar uma preparação enzimática com galactomananas junto com um largo espectro de atividades pectolíticas, hemicelulíticas e

celulíticas. Os métodos analíticos usados para determinar o teor de pectina resultariam em erros significativos se um nível elevado de carboidratos estivesse nas amostras de pectinas, de modo que as hemiceluloses e celulosas são quebradas, o qual pode ser visto pela redução da viscosidade do suco, as galactomananas são liberadas a partir das células liberando ácido galacturônico no suco, o qual aumenta com o aumento da concentração de enzima (BARROS, 2004).

A velocidade de uma reação enzimática depende da temperatura, onde quanto mais elevado seu valor, maior a velocidade da reação, até atingir a temperatura ótima, a partir da qual a atividade volta a diminuir, por desnaturação das moléculas de enzimas; e do pH, em que existe um pH ótimo, que corresponde a uma distribuição de cargas elétricas da molécula da enzima e, em especial, do sítio catalítico, ideal para a catálise (SERRALHA, 2003).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Matéria ó prima

A polpa de abacaxi da cultivar pérola (*Ananas comosus* (L.) Merr.) utilizada nos experimentos foi obtida a partir de frutos maduros (cerca de 14° Brix) adquiridos no entreposto da CEASA (Belém - PA). Após isso, os frutos foram transportados ao Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal do Pará (UFPA), para a extração da polpa.

4.2 Métodos

4.2.1 Extração da polpa

Após seleção e higienização, os frutos foram descascados e despolpados em despulpadeira industrial (itamet, modelo: bobina compacta), utilizando malhas de 1,6 mm de abertura. A polpa obtida foi acondicionada em embalagens de polietileno com capacidade de 500g e armazenadas em um freezer a uma temperatura de -18°C. A Figura 10 mostra o fluxograma de obtenção da polpa de abacaxi.

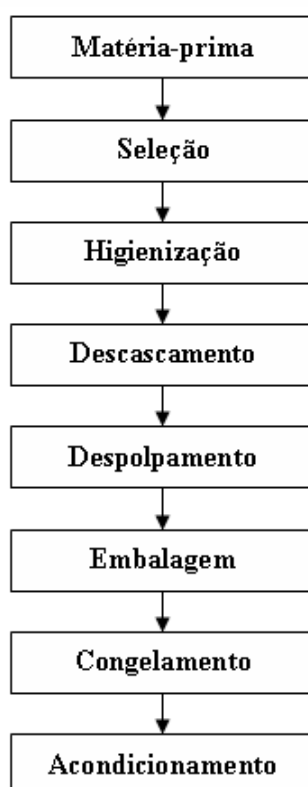


Figura 10. Fluxograma de obtenção da polpa de abacaxi.

4.2.2 Caracterização físico-química da matéria-prima

As seguintes análises foram realizadas na polpa integral de abacaxi:

- *Umidade* - A determinação de umidade foi realizada em estufa a 105°C, até peso constante, de acordo com o método 931.04 da AOAC (1997).
- *Sólidos solúveis (°Brix)* - A determinação foi feita por refratometria, de acordo com o método 932.12 da AOAC (1997). O valor lido no aparelho, correspondente a 20°C foi corrigido para a temperatura ambiente.
- *Acidez* - A determinação foi realizada pelo método de acidez titulável, de acordo com a metodologia 942.15 da AOAC (1997).
- *pH* - A determinação do pH foi realizada em pHmetro digital, de acordo com o método potenciométrico 945.10 da AOAC (1997).
- *Proteínas* - A determinação foi feita pelo método das proteínas totais (Kjeldahl), de acordo com a metodologia 920.152 da AOAC (1997), a qual é baseada na determinação da quantidade de nitrogênio total existente na amostra. A quantidade de proteína foi calculada partindo do princípio que a proteína possui, em média, 16% de nitrogênio.
- *Lipídios* - A determinação foi realizada por extração com solvente (éter de petróleo), em extrator Soxhlet, de acordo com o método 963.15 da AOAC (1997).
- *Cinzas* - A determinação de cinzas foi realizada por incineração da amostra em mufla a 525°C, de acordo com o método 940.26 da AOAC (1997).
- *Açúcares redutores (em glicose)* - O método de determinação de açúcares redutores em glicose foi proposto por Miller em 1959, onde se utiliza uma solução DNS contendo ácido 3,5 dinitrosalicílico, NaOH 2N e tartarato de sódio e potássio. A amostra diluída é adicionada à solução de DNS, sendo em seguida medida a absorbância a 540nm. Os resultados obtidos são comparados com uma curva de glicose, obtida nas mesmas condições das análises (MILLER, 1959).
- *Açúcares totais (em glicose)* - A determinação foi feita utilizando a mesma metodologia de determinação de açúcares redutores, tendo sido feita apenas uma hidrólise dos açúcares não redutores, pela adição de HCl (MILLER, 1959).
- *Açúcares não-redutores (em sacarose)*. Foi determinado pela diferença entre os valores de açúcares totais e açúcares redutores. Para efeitos de expressar os resultados em sacarose, o valor das diferenças foi multiplicado por 0,95 (MILLER, 1959).
- *Pectina* - A quantificação da pectina foi realizada pelo método de determinação fotométrico, no qual se mede fotometricamente, a 525nm, um produto de condensação

da pectina com etanol e outros reagentes químicos (MATISSEK, SCHNEPEL, STEINER, 1998).

- *Fibras* - Na quantificação das fibras totais e insolúveis foi utilizado o método 985.29 enzimático-gravimétrico, oficialmente adotado pela AOAC (1997). A determinação das fibras totais baseia-se no princípio de que amido e proteínas são removidos da amostra enzimaticamente e o resíduo resultante, o qual é insolúvel em etanol a 95%, é determinado gravimetricamente. Na quantificação da fração insolúvel não é realizada esta última etapa. Correções foram aplicadas pela dedução das frações de proteínas residuais e componentes inorgânicos (cinzas). O teor de fibras solúveis foi determinado por diferença entre as frações de fibras totais e fibras insolúveis.

4.2.3 Preparação das amostras

Para as análises reológicas, as amostras foram previamente descongeladas. A polpa de abacaxi foi centrifugada (centrífuga Logen, modelo: MTD III PLUS) a 3000 rpm por 15 minutos, proporcionando a separação do soro. O precipitado obtido nessa operação foi submetido a um peneiramento (peneiras de 32 e 42 tyler, com abertura de 340 e 247 μ m, respectivamente) sob agitação (agitador de peneiras Bertel, modelo: eletro - magnético) por 25 minutos. As frações obtidas no peneiramento foram posteriormente reconstituídas ao soro, na mesma fração de sólidos presente na amostra integral (12,88%), porém com diferentes tamanhos de partículas. Esse procedimento originou as amostras denominadas *õnaturaisö*, formadas por três tipos, sendo dois com diferentes tamanhos de partículas (submetidas ao peneiramento) e uma sem partículas presentes (centrifugada). A Tabela 2 mostra as codificações utilizadas para a identificação das amostras naturais.

Tabela 2. Codificações utilizadas para as amostras naturais.

Amostras	Codificação
Peneirada a 32 Tyler	AN1
Peneirada a 42 Tyler	AN2
Centrifugada	ANC

4.2.4 Tratamento enzimático

Antes do tratamento enzimático, foram realizados testes preliminares com diferentes níveis de temperatura, concentração de enzima e tempo de reação, para estabelecer as melhores condições de atuação da preparação enzimática comercial Pectinex XXL cedida pela Novozymes Latin América Limited sobre o suco de abacaxi, verificando a faixa em que houve uma maior hidrólise das pectinas. Os testes foram realizados levando-se em consideração que a atividade das pectinases aumenta até uma temperatura de 55°C (GOMES et al., 2006).

A Tabela 3 mostra o planejamento experimental, do tipo fatorial completo 2^k , onde k é o número de variáveis, utilizado nos testes, com três repetições do ponto central e três variáveis independentes, tendo como resposta à concentração de pectina nas amostras após os tratamentos. Os efeitos das variáveis de tratamento sobre a resposta foram avaliados por análise de variância (ANOVA), utilizando o software Statistica 5.5 (Statsoft ó USA), observando o efeito linear individual e as interações entre os parâmetros estudados. A significância dos resultados foi avaliada a um nível de probabilidade (p) de 0,05.

Tabela 3. Planejamento experimental 2^3 utilizado nos testes para avaliar as melhores condições de hidrólise da pectina.

Ensaio	[] de enzima (mg/L)	Temperatura (°C)	Tempo (min)
1	150	30	40
2	150	30	80
3	150	50	40
4	150	50	80
5	450	30	40
6	450	30	80
7	450	50	40
8	450	50	80
9 (C)	300	40	60
10 (C)	300	40	60
11 (C)	300	40	60

Após serem definidas as melhores condições de hidrólise da pectina, o tratamento enzimático foi realizado em tubos de aço inoxidável fechados com capacidade de 50 mL, ao

abrigo da luz. Para interromper a atividade da enzima, as amostras foram submetidas a uma temperatura de 85°C por 10 minutos.

As amostras submetidas ao tratamento enzimático foram preparadas para as análises reológicas pelo mesmo procedimento descrito no item 4.2.3, sendo denominadas de amostras despectinizadas, totalizando três amostras, sendo duas com diferentes tamanhos de partículas (submetidas ao peneiramento) e uma sem partículas presentes (centrifugada). A Tabela 4 indica as codificações usadas para as amostras despectinizadas.

Tabela 4. Codificações utilizadas para as amostras despectinizadas.

Amostras	Codificação
Peneirada a 32 Tyler	AD1
Peneirada a 42 Tyler	AD2
Centrifugada	ADC

4.2.5 Medidas reológicas

Os ensaios reológicos foram realizados mediante o emprego de um viscosímetro de cilindros concêntricos Brookfield (Figura 11), modelo LVDV II (Brookfield Engineering Laboratory Inc.), acoplado a um banho termostático, fornecendo os parâmetros de viscosidade (cP), taxa de deformação (s^{-1}) e tensão de cisalhamento (D/cm^2) para as amostras naturais e despectinizadas através do programa de ajuste WINGATHER®. Os ensaios foram realizados em duplicata, sendo utilizados na análise reológica, os valores obtidos das médias de viscosidade, tensão de cisalhamento e taxa de deformação. Este sistema cujo cilindro interno é rotacional e o externo fixo baseia-se na determinação do torque no próprio cilindro interno.

Para cada um dos ensaios foram utilizados 40mL de amostra, analisada com o spindle de especificação DIN S85 (Figura 12), em quatro diferentes temperaturas (10, 25, 50 e 65°C), sendo a temperatura de 10°C selecionada por ser a temperatura usual da polpa descongelada e a de 60°C, por ser a temperatura de pasteurização industrial da polpa. As velocidades rotacionais do cilindro interno estiveram dentro da faixa de 5 a 160 rpm e a taxa de deformação entre 6,4 e 206 s^{-1} . Antes de iniciar cada ensaio, foi estabelecido um tempo de 10 minutos para a calibração do equipamento.



Figura 11. Equipamento utilizado na determinação do comportamento reológico das amostras do suco de abacaxi.



Figura 12. Acessórios do viscosímetro LVDV II.

Diferentes modelos reológicos foram ajustados aos dados de taxa de deformação e tensão de cisalhamento, obtidos experimentalmente. O ajuste foi efetuado por regressão não-linear dos modelos Casson, Lei da potência e Mizrahi-Berk utilizando o software Statistica 5.5 (Statsoft ó USA), para a descrição do comportamento reológico das amostras do suco de abacaxi analisadas (natural e despectinizado). A seleção do melhor modelo foi baseada nos parâmetros estatísticos coeficiente de correlação (R^2); erro padrão (Equação 9); soma dos quadrados dos resíduos (SQR), calculado através da Equação 10, onde o modelo que apresenta o menor valor de SQR ($SQR > 0$) é assumido com sendo o melhor; qui-quadrado (χ^2), obtido da Equação 11 onde é expressa a diferença entre os valores calculados e os obtidos experimentalmente, ao passo que quanto maior o valor de χ^2 , maior será a discrepância entre as frequências observadas e esperadas; e o fator bias (B_f) (Equação 12), utilizado para avaliar a relação entre os valores observados e preditos pelo modelo, indicando se as predições situam-se acima ou abaixo da linha de equivalência. Uma boa relação entre os valores observados e os preditos deve possuir um valor de B_f igual a um.

$$EP = \left(\frac{\sum (V_{Exp} - V_{Pred})^2}{N - 1} \right)^{1/2} \quad (9)$$

Onde: V_{Exp} = Valores obtidos experimentalmente; V_{Pred} = Valores obtidos pelos modelos ajustados; N = número de observações.

$$SQR = \sum_{i=1}^N (V_{Exp} - V_{Pred})^2 \quad (10)$$

Onde: V_{Exp} = Valores obtidos experimentalmente; V_{Pred} = Valores obtidos pelos modelos ajustados.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(V_{Exp} - V_{Pred})^2}{N - n} \quad (11)$$

Onde: V_{Exp} = Valores obtidos experimentalmente; V_{Pred} = Valores obtidos pelos modelos ajustados; N = número de observações; n = número de parâmetros do modelo.

$$B_f = 10^{\left[\frac{\sum (V_{Pred} - V_{Exp})}{N} \right]} \quad (12)$$

Onde: V_{Pred} = Valores obtidos pelos modelos ajustados; V_{Exp} = Valores obtidos experimentalmente; N = número de observações.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização físico-química da polpa de abacaxi

Os resultados da caracterização da polpa de abacaxi integral podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5. Composição físico-química da polpa de abacaxi.

Análises	Média (b.u.)
Umidade (%)	87,12 ± 0,09
Sólidos solúveis (° Brix)	14,50 ± 0,02
Cinzas (g/100g)	0,30 ± 0,02
Lipídeos (g/100g)	0,01 ± 0,15
Proteínas (g/100g)	0,41 ± 0,23
Açúcares redutores (g/100g)	7,2 ± 0,003
Açúcares não ó redutores (g/100g)	4,09 ± 0,003
Fibras solúveis (g/100g)	0,25 ± 0,13
Fibras insolúveis (g/100g)	0,60 ± 0,04
Acidez (g de ácido cítrico/100g suco)	0,73 ± 0,08
pH	3,46 ± 0,03

Verifica-se que na polpa de abacaxi analisada destacam-se os elevados teores de açúcares, sendo predominantes os açúcares redutores, que podem favorecer reações de escurecimento não-enzimático. A quantidade de fibras foi de 0,85 g/100g, sendo este valor próximo ao estimado na Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO - 2006), que indica 1,0 g/100g de fibras na polpa de abacaxi. Os teores de sólidos solúveis encontrados foram superiores aos estimados por Pinheiro et al. (2006), para o suco integral de abacaxi (cerca de 13,5° Brix). Seu conteúdo de cinzas foi pequeno, aproximadamente 0,3%.

O percentual de proteínas foi menor que o indicado estimado na TACO (2006), que é de 0,9 g/100g. O valor de pH encontrado foi menor que o proposto por Sarzi, Durigan (2002), para amostras de abacaxi pérola, que foi de 3,8. A acidez apresenta uma relação inversamente proporcional ao pH, logo os valores de acidez encontrados para a polpa de abacaxi foram maiores que os encontrados por esses autores.

5.2 Tratamento enzimático

As concentrações de pectina determinadas para cada tratamento utilizado nos testes preliminares, podem ser observadas na Tabela 6.

Tabela 6. Concentração de pectina obtida para os ensaios do planejamento experimental utilizado nos testes preliminares.

Ensaio	[] de enzima (mg/L)	Temperatura (°C)	Tempo (min)	[] de pectina (mgAG/L)
1	150	30	40	710,994
2	150	30	80	365,474
3	150	50	40	206,874
4	150	50	80	105,531
5	450	30	40	641,895
6	450	30	80	501,416
7	450	50	40	359,809
8	450	50	80	104,917
9 (C)	300	40	60	272,013
10 (C)	300	40	60	215,371
11 (C)	300	40	60	274,845

A concentração de pectina presente na polpa de abacaxi integral é de 1770,4 mgAG/L. Ao analisar os resultados obtidos, verifica-se que o tratamento do ensaio número oito proporcionou a menor concentração de pectina dentre todos os ensaios realizados, indicando que houve uma maior hidrólise das pectinas presentes na amostra pela atuação da enzima, resultando numa redução de 94,07% na sua concentração.

De um modo geral, quanto maior a concentração de enzima utilizada nos experimentos, maior será o ataque ao substrato e consequentemente haverá uma maior redução da concentração de pectina presente na amostra. Porém, ao avaliar os dados dos testes preliminares através da análise de variância (ANOVA), é possível verificar que a variável concentração de enzima não exerce efeito estatisticamente significativo sobre a resposta ($p > 0,05$), como mostra a Tabela 7. Isso significa dizer que uma mudança nos níveis desta variável (do menor para o maior nível), resulta em um aumento no valor da resposta (Figura 13), o que não é desejável, levando a conclusão de que o tratamento enzimático deve ser

realizado com a menor concentração de enzima, uma vez que a variável não exerce efeito significativo sobre a resposta.

Este resultado pode ser justificado pela utilização de concentrações de enzima onde a mesma estava saturada com o substrato, ou seja, praticamente todas as moléculas de enzima estão na forma do complexo ES e a concentração de enzima livre E é insignificante, sendo atingida a velocidade inicial máxima da reação ($V_{\text{máx}}$). Esta condição de saturação existirá sempre que a concentração de substrato S for suficientemente alta para manter todas as moléculas de enzima na forma combinada com o substrato ES (LEHNINGER; NELSON; COX, 1995).

Tabela 7. Resultados obtidos na análise de variância (ANOVA).

Fatores	SS	DF	MS	p
Concentração (1)	6004,1	1	6004,1	0,147178
Temperatura (2)	260154,2*	1*	260154,2*	0,004299*
Tempo (3)	88669,8*	1*	88669,8*	0,012457*
12	913,3	1	913,3	0,462772
13	331,4	1	331,4	0,641766
23	2104,8	1	2104,8	0,304871
123	16073,3	1	16073,3	0,063437
Falta de ajuste	31700,2	1	31700,2	0,33721
Erro Puro	2251,2	2	1125,6	
Total SS	408202,3	10		
$R^2 = 0,9168$				

^{SS}Soma dos quadrados, ^{DF}Graus de liberdade, ^{MS}Média dos quadrados, *Estatisticamente significativo para $p < 0,05$.

Barros, Mendes, Peres (2004) obtiveram resultados semelhantes ao estudar o suco de abacaxi. Estes autores verificaram que ao realizar o tratamento enzimático variando a concentração de enzima entre 20, 100 e 300 mg/L, a uma temperatura de 40°C por 60 minutos, a maior redução da concentração de ácido galacturônico foi obtida com o tratamento que utilizou a menor concentração de enzima, ou seja, 20 mg/L a 40°C por 60 minutos.

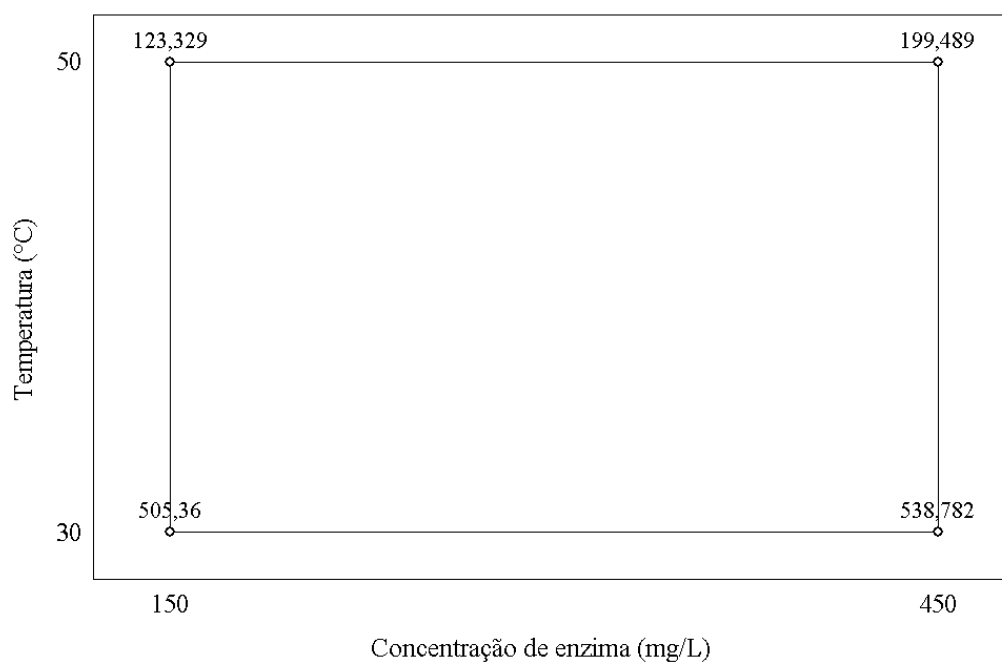


Figura 13. Efeito da concentração de enzima e da temperatura sobre a concentração de pectina.

Pela análise de variância, para a confiança de 95%, as variáveis temperatura e tempo exerceram efeito estatisticamente significativo ($p < 0,05$) sobre a resposta nas condições utilizadas (Tabela 7). Isso indica que uma mudança nos níveis das duas variáveis (do menor para o maior nível) causa uma redução no valor da resposta (Figura 14), sendo este efeito desejável.

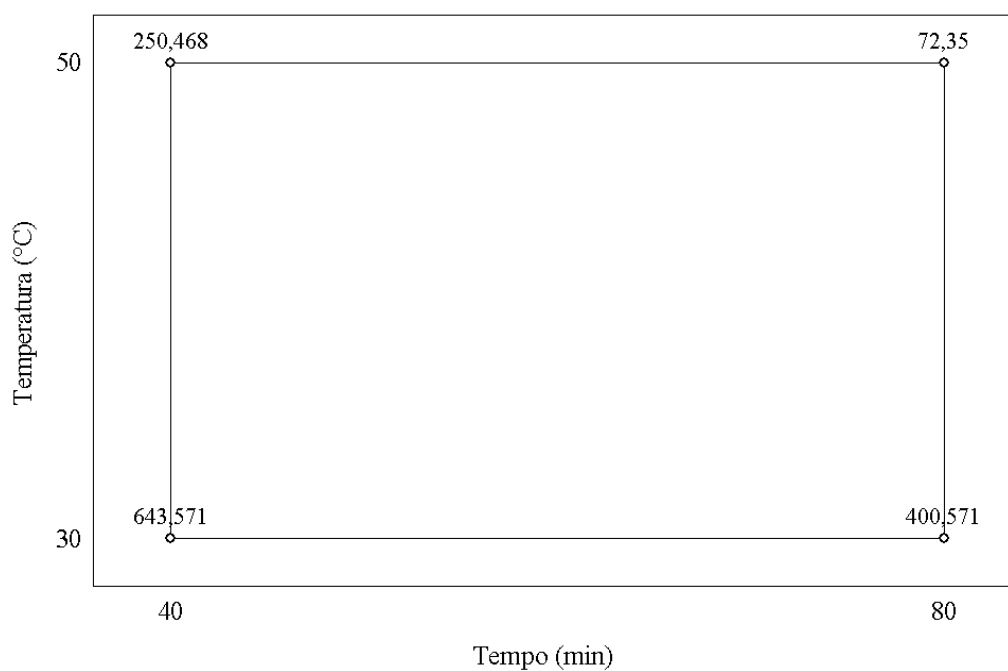


Figura 14. Efeito do tempo de tratamento e da temperatura sobre a concentração de pectina.

O efeito significativo da temperatura era esperado, uma vez que esta variável apresenta grande influência sobre a velocidade das reações enzimáticas, havendo o máximo de atividade na faixa de temperatura ótima de atuação da enzima, que no caso das pectinases é de aproximadamente 55°C. Este fato justifica a influência significativa do maior nível de temperatura utilizado nos testes preliminares (50°C), pois o mesmo encontra-se mais próximo do ponto ótimo de atuação da enzima utilizada.

Pelos resultados obtidos, o ensaio selecionado para a realização do tratamento enzimático foi o de número quatro, apresentando um percentual de redução na concentração de pectina de 94,04%.

5.3 Comportamento reológico

Os resultados obtidos pelo ajuste dos modelos Casson, Lei da potência e Mizrahi-Berk aos dados experimentais das amostras do suco de abacaxi natural com diferentes tamanhos de partículas (AN1, AN2 e ANC), indicaram que o modelo de Mizrahi-Berk proporcionou os melhores parâmetros estatísticos de controle para a amostra AN1 em todas as faixas de temperatura, apresentando os maiores valores para o parâmetro coeficiente de correlação (R^2), bem como os menores valores para o qui-quadrado (χ^2) e para a soma dos quadrados dos resíduos (SQR), além de baixos valores de erro padrão (EP) e um fator bias (B_f) igual a um, sendo por isso aceitável para descrever o comportamento reológico da amostra AN1. As Tabelas 8, 9 e 10 mostram os parâmetros de ajuste dos modelos de Mizrahi-Berk, Lei da potência e Casson, respectivamente, para a amostra AN1 nas quatro temperaturas utilizadas.

Tabela 8. Parâmetros do modelo de Mizrahi-Berk para a amostra AN1 do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
K_{0M}	0,3719	0,4265	0,3804	0,3138
K_M	0,0347	0,0079	0,0026	0,0013
nM	0,6113	0,8293	0,9450	1,0718
R^2	0,9979	0,9961	0,9961	0,9945
χ^2	0,0004	0,0003	$6,5 \times 10^{-5}$	$6,7 \times 10^{-5}$
SQR	0,0047	0,0047	0,0008	0,0007
B_f	1,0034	1,0027	0,9999	0,9885
EP	0,0177	0,0172	0,0075	0,0075

Tabela 9. Parâmetros do modelo Lei da potência para a amostra AN1 do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
K	0,3835	0,0268	0,0175	0,0057
n	0,6932	0,6938	0,6533	0,8297
R ²	0,9887	0,9678	0,9708	0,9636
²	0,0018	0,0026	0,0005	0,0004
SQR	0,0249	0,0395	0,0059	0,0049
B _f	0,9624	0,9410	0,9868	0,9838
EP	0,0408	0,0497	0,0206	0,0194

Tabela 10. Parâmetros do modelo de Casson para a amostra AN1 do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
K _{0C}	0,2693	0,2387	0,2058	0,0967
K (Pa.s ⁿ)	0,0689	0,0564	0,0386	0,0411
R ²	0,9963	0,9840	0,9835	0,9702
²	5,7 x 10 ⁻⁴	0,0013	2,6 x 10 ⁻⁴	3,3 x 10 ⁻⁴
SQR	0,0080	0,0196	0,0033	0,0039
B _f	0,9926	0,9781	0,9937	0,9901
EP	0,0231	0,0350	0,0154	0,0175

Para as amostras AN2 e ANC, todos os modelos utilizados apresentaram parâmetros de controle (R², ², SQR, B_f, EP) aceitáveis para serem escolhidos como representativos do seu comportamento reológico, como pode ser observado no Anexo A.

Os dados das Tabelas 8 e 9 mostram que ocorre uma redução dos valores do índice de consistência (K) e um aumento do índice de comportamento (n) da amostra AN1 nos dois modelos, a medida em que há o aumento da temperatura. Esse comportamento foi observado por Silva, Guimarães, Gasparetto (2005) e Vidal, Pellegrini, Gasparetto (2004), ao analisar respectivamente o suco de acerola e a polpa de manga. O valor do índice de comportamento indica o grau de pseudoplasticidade de sucos de frutas, de forma que, quanto mais afastado se encontra da unidade, maior a pseudoplasticidade do produto.

Ao analisar os dados das amostras despectinizadas (AD1, AD2 e ADC), verifica-se que a amostra AD1 apresentou um comportamento similar ao visto para a amostra AN1, onde o modelo de Mizrahi-Berk apresentou os melhores parâmetros de controle, sendo aceito como descritivo do comportamento reológico da amostra analisada. Contudo, na amostra despectinizada não foi observado o aumento dos valores de **n** e a redução do **K** com a elevação da temperatura de tratamento de 10°C para 25°C no ajuste dos modelos Mizrahi-Berk e Casson, ocorrendo nessa faixa uma tendência inversa, como mostram as Tabelas 11, 12 e 13. Esse efeito foi verificado em todas as amostras despectinizadas, onde em vários intervalos de temperatura não houve necessariamente uma redução de **K** e um aumento de **n**. Para as amostras AD2 e ADC, todos os modelos utilizados apresentaram parâmetros aceitáveis para serem utilizados na descrição do comportamento reológico das mesmas, como pode ser observado no Anexo B.

Tabela 11. Parâmetros do modelo de Mizrahi-Berk para a amostra AD1 do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
K_{0M}	0,2903	0,1159	0,2382	0,2134
K_M	0,0171	0,0312	0,0040	$7,5 \times 10^{-4}$
n_M	0,7201	0,6212	0,8697	1,1803
R^2	0,9994	0,9990	0,9927	0,9932
χ^2	$5,9 \times 10^{-5}$	$6,8 \times 10^{-5}$	$7,1 \times 10^{-5}$	$6,7 \times 10^{-5}$
SQR	$7,7 \times 10^{-4}$	$8,2 \times 10^{-4}$	$7,1 \times 10^{-4}$	$6,05 \times 10^{-4}$
B_f	1,0019	1,0011	1,0006	0,9871
EP	0,0072	0,0077	0,0077	0,0074

Tabela 12. Parâmetros do modelo Lei da potência para a amostra AD1 do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
K	0,0103	0,0038	0,0028	0,0004
n	0,8826	1,0312	0,9403	1,2813
R ²	0,9929	0,9984	0,9896	0,9821
χ^2	0,0007	0,0001	9 x 10 ⁻⁵	0,0002
SQR	0,0092	0,0013	0,00102	0,0016
B _f	0,9644	0,9911	0,9975	0,9895
EP	0,0247	0,0096	0,0092	0,0121

Tabela 13. Parâmetros do modelo de Casson para a amostra AD1 do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
K _{0C}	0,0980	-0,0174	0,0329	-0,1249
K (Pa.s ⁿ)	0,0675	0,0683	0,0428	0,0513
R ²	0,9955	0,9981	0,9901	0,9778
χ^2	0,0004	0,0001	9 x 10 ⁻⁵	0,0002
SQR	0,0058	0,0014	0,00097	0,0020
B _f	0,9809	0,9921	0,9985	0,9916
EP	0,0197	0,0101	0,0090	0,0134

Dentre os três modelos utilizados para descrever o comportamento reológico do suco de abacaxi, o de Mizrahi-Berk destaca-se, pois ajustou os dados de todas as amostras analisadas (naturais e despectinizadas) e de um modo geral apresentou os melhores resultados para os parâmetros estatísticos R², χ^2 , SQR, B_f, EP em todas as faixas de temperatura. Paralelamente, segundo Pelegrini, Vidal, Gasparetto (2000) é o modelo que melhor tem se ajustado à maioria dos reogramas das polpas, sucos e purês de frutas, já que os autores o desenvolveram baseando-se no modelo de uma suspensão de partículas interagindo em um solvente pseudoplástico. Com isso, o modelo proposto por Mizrahi-Berk, foi selecionado como o representativo para descrever o comportamento reológico de todas as amostras analisadas (naturais e despectinizadas).

Ao avaliar os valores dos índices de comportamento (calculados pelo ajuste do modelo de Mizrahi-Berk aos dados experimentais) dos fluidos analisados, observa-se que a maioria das amostras apresentou comportamento não-newtoniano, sendo classificadas como fluidos pseudoplásticos ($n < 1$). Esse resultado está de acordo com Nagy, Chen, Shaw (1993), que afirmam que polpas de frutas, onde grande quantidade de material particulado insolúvel está presente, são fluidos altamente não-newtonianos. Este comportamento (pseudoplasticidade), também foi verificado Por Pelegrini, Vidal, Gasparetto (2000); Silva, Guimarães, Gasparetto (2005); Sugai, Tadini, Tribess (2002), respectivamente para as polpas de manga e abacaxi, suco de acerola e purê de manga.

Tabela 14. Valores do índice de comportamento calculados pelo ajuste do modelo de Mizrahi-Berk nas quatro temperaturas utilizadas.

Amostras	n (índice de comportamento)			
	10°C	25°C	50°C	65°C
AN1	0,6113	0,8293	0,9450	1,0718
AN2	0,5110	0,3076	1,0373	1,0454
ANC	0,5371	0,6057	0,9894	0,5220
AD1	0,7201	0,6212	0,8697	1,1803
AD2	0,4986	0,4903	1,2142	0,5822
ADC	0,5292	0,6576	0,8921	0,2193

5.3.1 Efeito da temperatura

O efeito da temperatura sobre o comportamento reológico do suco de abacaxi, visto pelo gráfico da tensão de cisalhamento () em função da taxa de deformação () ajustado pelo modelo de Mizrahi-Berk, pode ser verificado nas Figuras 15 e 16, para as amostras AN1 e AD1, respectivamente.

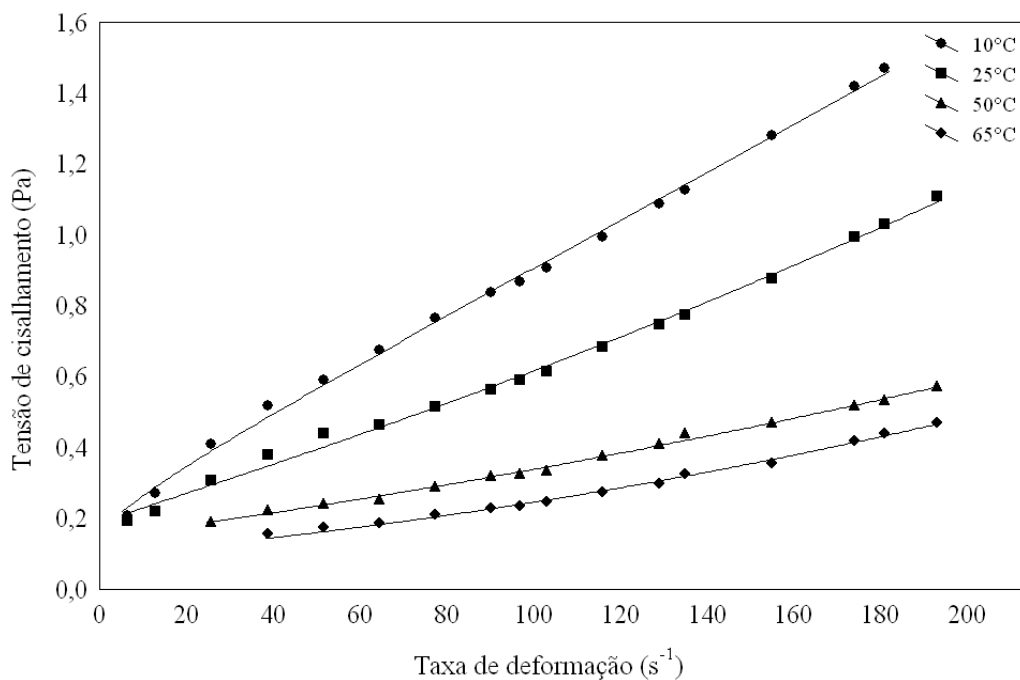


Figura 15. Influência da temperatura descrita pelo modelo de Mizrahi-Berk para a amostra AN1.

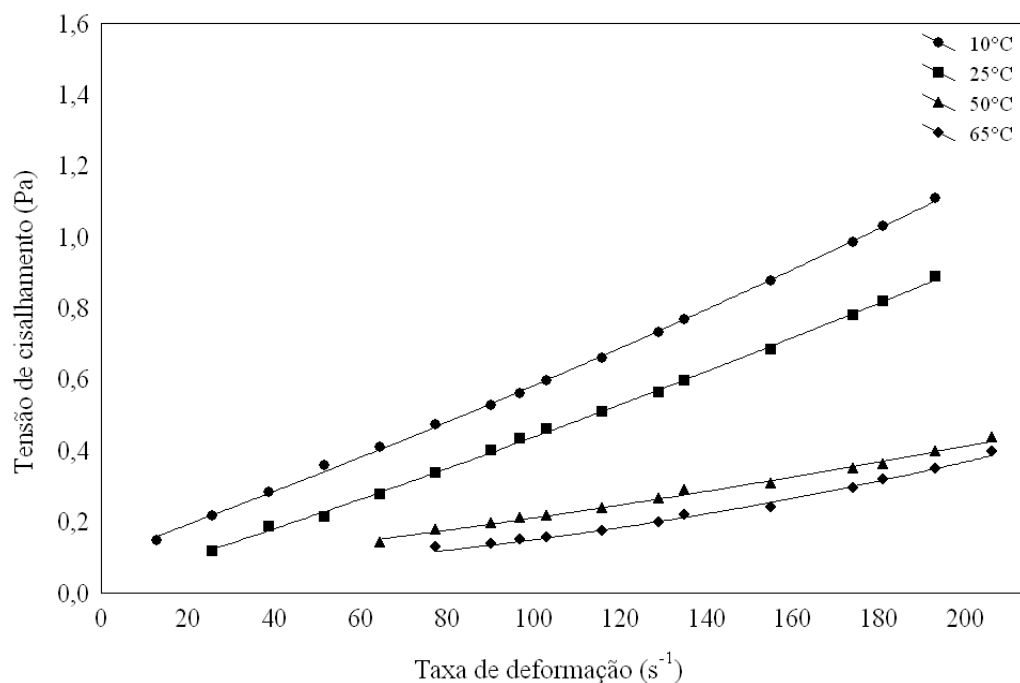


Figura 16. Influência da temperatura descrita pelo modelo de Mizrahi-Berk para a amostra AD1.

É possível verificar tanto para as amostras naturais como para as despectinizadas, que para uma taxa de deformação constante, há uma diminuição dos valores de tensão de cisalhamento com o aumento da temperatura, sendo esse comportamento observado nas seis amostras analisadas (naturais e despectinizadas). Este efeito pode ser explicado pelo colapso estrutural da polpa devido à força hidrodinâmica gerada e o aumento do alinhamento das moléculas constituintes (ALPARLAN, HAYTA, 2002; RAO, 1999).

Sugai, Tadini, Tribess (2002) avaliaram a influência da temperatura sobre as características reológicas do purê de manga e verificaram diferenças encontradas para cada tratamento térmico utilizado, decorrentes do efeito diferenciado que a combinação tempo/temperatura de processo exerce sobre a pectina naturalmente presente na fruta. Pode ocorrer tanto a gelificação como a desnaturação da pectina, o que provocaria o aumento ou a diminuição de sua viscosidade aparente.

A viscosidade aparente das amostras AN1 e AD1 do suco de abacaxi foi calculada de acordo com os parâmetros reológicos do modelo de Mizrahi-Berk, tensão inicial (K_{OM}), índice de comportamento do fluido (n_M) e o índice de consistência (K_M), através dos dados das Tabelas 8 e 11, respectivamente.

Substituindo a equação do modelo de Mizrahi-Berk (Equação 5) na Equação 2.

$$\eta_{ap} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2)$$

$$\tau^{1/2} = K_{OM} + K_M \times \dot{\gamma}^{n_M} \quad (6)$$

Tem-se a equação:

$$\eta_{ap} = \frac{\left(K_{OM} + K_M \times \dot{\gamma}^{n_M} \right)^2}{\dot{\gamma}} \quad (13)$$

Silva, Guimarães, Gasparetto (2005) estudaram o efeito da concentração e da temperatura na reologia do suco de acerola. Esses autores verificaram que a viscosidade aparente, calculada para uma taxa de deformação de $100s^{-1}$, aumenta com o inverso da temperatura, indicando que este parâmetro diminui com o aumento da temperatura. Para as amostras do suco de abacaxi, os valores de viscosidade aparente calculados a uma taxa de deformação de $103s^{-1}$ diminuiram com o aumento da temperatura, como pode ser observado na Tabela 15.

Tabela 15. Influência da temperatura sobre a viscosidade aparente das amostras AN1 e AD1 a uma taxa de deformação de 103s^{-1} .

	AN1				AD1			
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	10	25	50	65	10	25	50	65
η_{ap} (Pa.s)	0,0089	0,006	0,0032	0,0024	0,0057	0,0043	0,0021	0,0014

A relação da viscosidade aparente com a taxa de deformação apresentou comportamento semelhante, ou seja, ocorre uma redução nos valores desse parâmetro com o aumento da taxa de deformação tanto nas amostras naturais como nas despectinizadas (Figuras 17 e 18), o que é característico do comportamento pseudoplástico. FERREIRA et al. (2002) encontraram esta mesma tendência estudando as propriedades reológicas da polpa de goiaba e VIDAL (2000) estudando o comportamento reológico da polpa de manga (*Mangífera indica L-Keitt*).

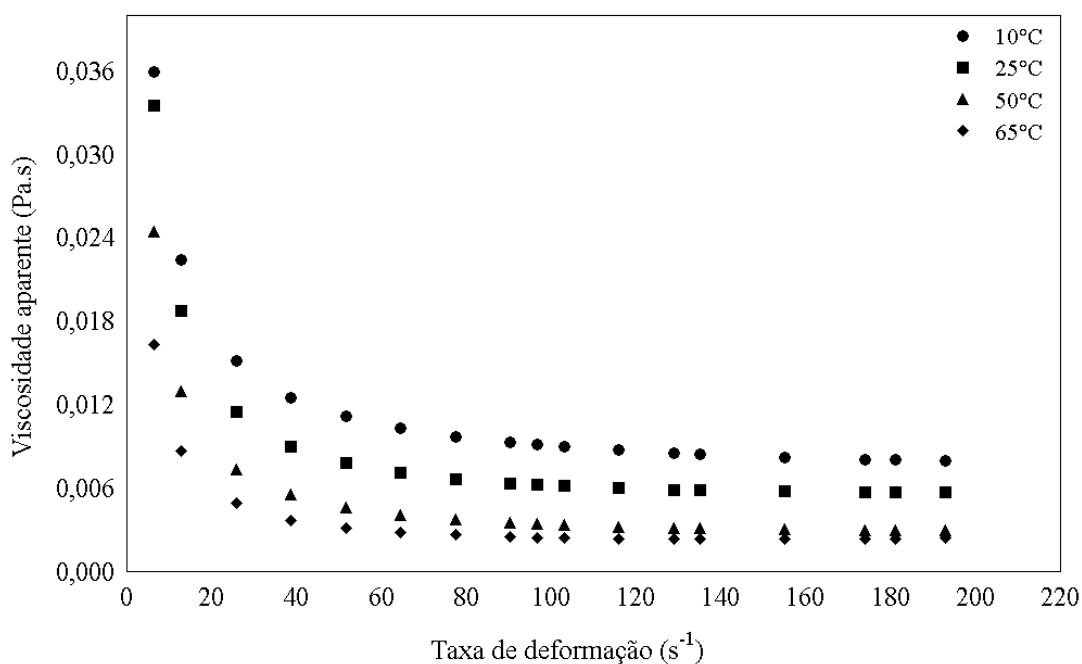


Figura 17. Relação entre viscosidade aparente e taxa de deformação para a amostra AN1.

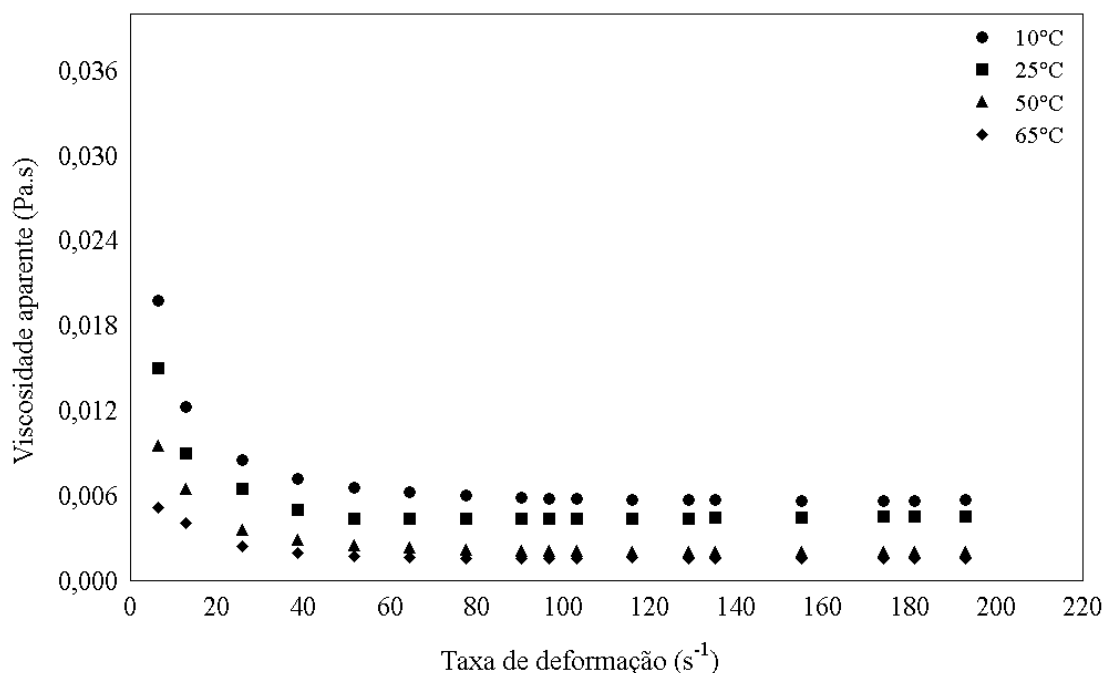


Figura 18. Relação entre viscosidade aparente e taxa de deformação para a amostra AD1.

Segundo Constenla, Lozano, Crapiste (1989), a redução na viscosidade aparente pode ser atribuída a um aumento nas distâncias intermoleculares que ocorrem em função da expansão térmica causada pelo aumento na temperatura. Hassan, Hobani (1998), acrescentam que a força de cisalhamento quando associada com a aplicação de temperatura, faz com que as partículas se reorganizem em direções paralelas e as partículas maiores são quebradas em partículas menores. Essas partículas podem escoar mais facilmente como um resultado da diminuição da interação partícula-partícula, a qual resulta na diminuição da viscosidade.

Uma análise de regressão não-linear foi usada na equação de Arrhenius (Equação 7), a fim de determinar os parâmetros da relação entre a viscosidade aparente (calculada a uma taxa de deformação de 103s⁻¹) e a temperatura. A equação de Arrhenius tem sido usada com sucesso para prever a dependência da temperatura de fluidos alimentícios ricos em açúcares e sucos de frutas (KHALIL et al., 1989).

$$\eta_{ap} = \eta_o \times \exp\left(\frac{E_{at}}{RT}\right) \quad (7)$$

A equação de Arrhenius apresentou um bom ajuste do efeito da temperatura na viscosidade aparente das amostras do suco de abacaxi natural e despectinizado, como pode ser visto na Figura 19.

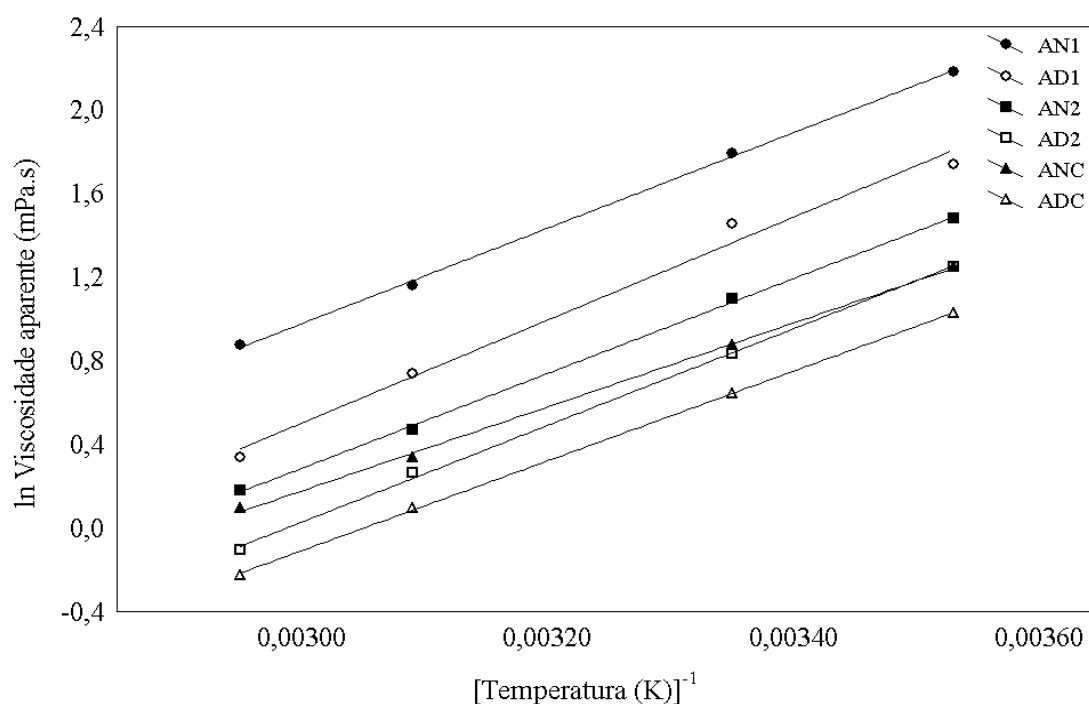


Figura 19. Efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente das amostras do suco de abacaxi ajustado pela equação de Arrhenius.

Os valores da energia de ativação (E_{at}) calculados para as seis amostras analisadas, podem ser observados na Tabela 16. É possível verificar um aumento dos valores de E_{at} das amostras despectinizadas em relação às amostras naturais.

Tabela 16. Valores da energia de ativação para as amostras naturais e despectinizadas.

	Amostras					
	AN1	AN2	ANC	AD1	AD2	ADC
E_{at} (kcal.g.mol ⁻¹)	4,54	4,51	3,99	4,89	4,59	4,27

De acordo com Steffe (1996), em um sistema, altos valores de E_{at} indicam uma mudança mais rápida da viscosidade aparente com a temperatura. Comparando as amostras naturais as despectinizadas, observa-se que devido ao maior valor de energia de ativação do material despectinado, a viscosidade aparente dessas amostras tem a sua estrutura molecular mais influenciada pela temperatura do que o material natural, ou seja, as amostras despectinizadas têm maior facilidade de escoamento devido a maior energia de ativação, do que as amostras naturais. Esse efeito pode ser justificado pela mudança na estrutura das

amostras através do tratamento enzimático realizado, onde ocorre a hidrólise da fração de pectina presente nas amostras, fazendo com que ocorram mudanças no comportamento reológico das amostras e estas sejam mais influenciadas pela mudança de temperatura.

Toralles, Vendruscolo, Vendruscolo (2006) analisaram o efeito da temperatura e concentração na reologia de purê homogeneizado de pêssego, verificando uma forte influência da temperatura na viscosidade aparente, que decresceu com o aumento da temperatura, assim como o índice de consistência (k), sendo este comportamento também observado na amostra AN1 do suco de abacaxi.

Zuritz et al. (2005) avaliaram a viscosidade do suco de uva em diferentes temperaturas (20, 30, 40, 50, 60, 70, 80°C), e também verificaram uma redução dos valores desse parâmetro com o aumento da temperatura.

Do ponto de vista industrial, a diminuição da viscosidade facilita o escoamento da polpa e a troca de calor durante o processamento. Sabe-se que quanto menor a viscosidade de um fluido, menor é a perda de carga durante o escoamento, o que resulta em um menor gasto de energia.

5.3.2 Efeito do tamanho de partículas

As Figuras 20 e 21 mostram a influência dos diferentes tamanhos de partículas utilizados sobre os dados de comportamento reológico das amostras do suco de abacaxi natural e despectinizado, ajustados pelo modelo de Mizrahi-Berk a 25°C.

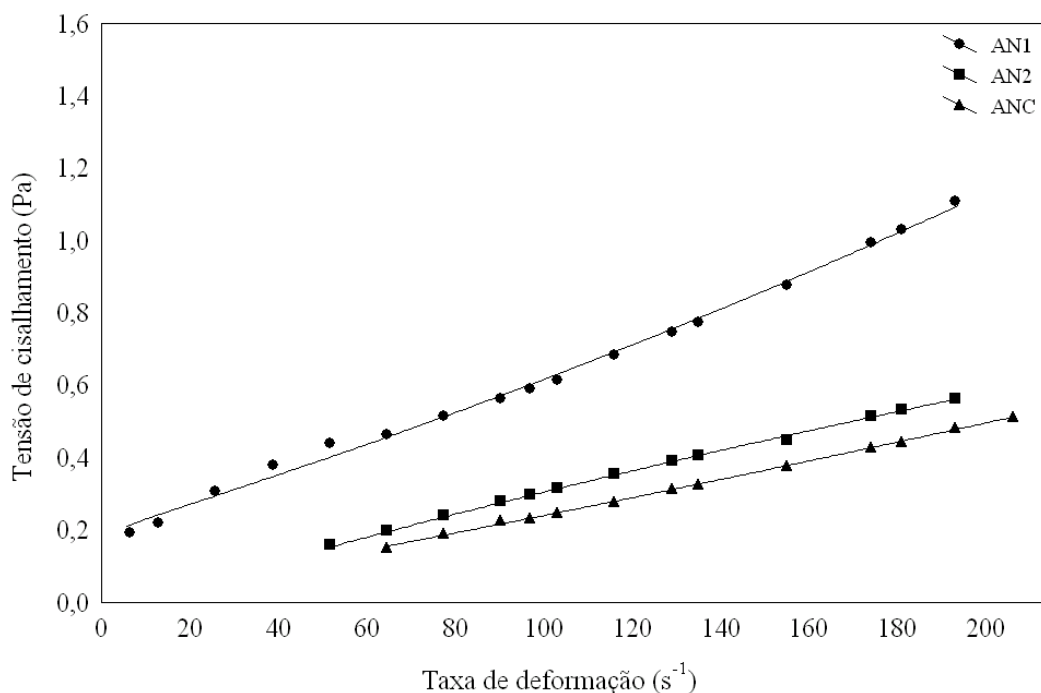


Figura 20. Influência do tamanho de partículas sobre os dados das amostras naturais ajustados pelo modelo de Mizrahi-Berk a 25°C.

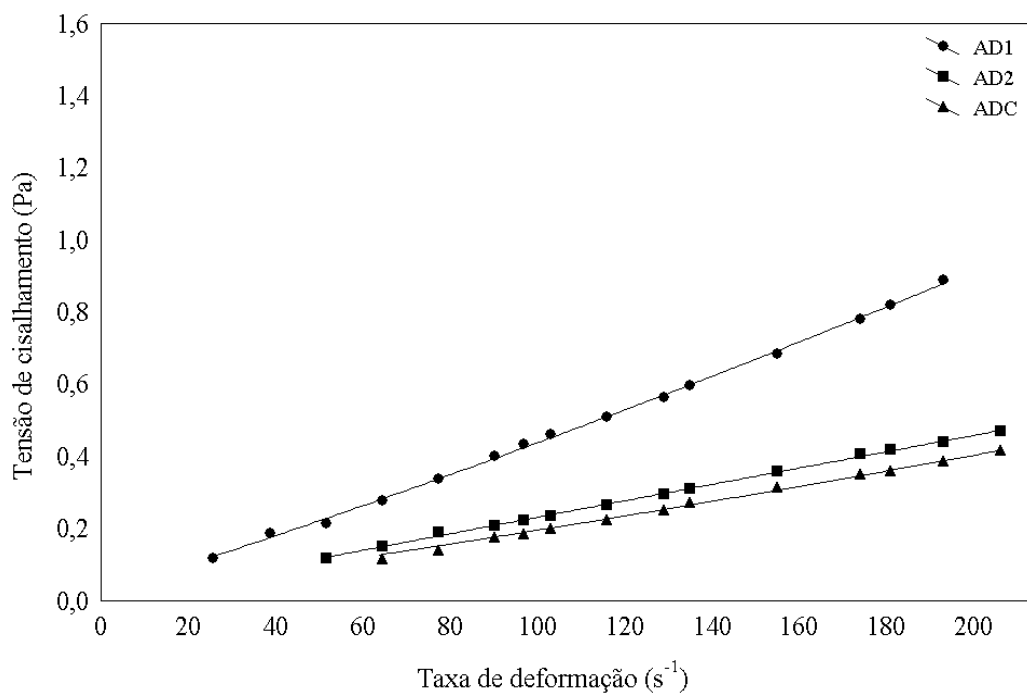


Figura 21. Influência do tamanho de partículas sobre os dados das amostras despectinizadas ajustados pelo modelo de Mizrahi-Berk a 25°C.

O comportamento reológico das amostras do suco de abacaxi com diferentes tamanhos de partículas, indicou que ocorre uma diminuição do valor da tensão de cisalhamento bem como da viscosidade aparente (a uma taxa de deformação e temperatura constantes) com a redução dos tamanhos das moléculas presentes, sendo os menores valores, observados para as amostras isentas de partículas (centrifugadas), como mostra a Tabela 17.

Tabela 17. Viscosidade aparente das amostras do suco de abacaxi com diferentes tamanhos de partícula a 25°C e 103s⁻¹.

Amostras						
	AN1	AN2	ANC	AD1	AD2	ADC
η_{ap} (Pa.s)	0,0060	0,0030	0,0024	0,0043	0,0023	0,0019

Esse comportamento foi observado por Queiroz, Vidal, Gasparetto (2000) para o suco de abacaxi. Esses autores verificaram que o teor de sólidos insolúveis suspensos é um dos principais fatores responsáveis pelo comportamento reológico de polpas de abacaxi, ao passo que a eliminação total dos sólidos insolúveis através de centrifugação reduziu a viscosidade aparente para menos de 1/16 do valor da viscosidade aparente da polpa integral, a uma taxa de deformação de 300s⁻¹. Para o suco de abacaxi analisado, a redução da viscosidade aparente (calculada a uma taxa de deformação de 103 s⁻¹) com a centrifugação foi de 60% e 55,81%, respectivamente para as amostras naturais e despectinizadas.

Toralles, Vendruscolo, Vendruscolo (2006), trabalhando com o purê homogeneizado de pêssgo, avaliaram a influência da concentração de sólidos e verificaram um aumento da viscosidade com a elevação da concentração para uma dada temperatura. Nas amostras do suco de abacaxi verificou-se um comportamento semelhante, na medida em que ocorre o aumento do tamanho das partículas presentes nas amostras analisadas a uma temperatura constante, há um aumento na viscosidade das mesmas (Tabela 17).

FREITAS (2002) relacionou as partículas de polpas de frutas à pectina presente no meio, uma vez que a remoção das partículas em suspensão levou a um decréscimo da quantidade de pectina das amostras. A presença e tamanho das partículas em suspensão dependem principalmente do tipo de processo utilizado na obtenção da polpa.

Através de um ajuste não-linear dos dados de viscosidade aparente obtidos, foi possível calcular os valores da energia de ativação do suco de abacaxi para os diferentes tamanhos de partículas presentes, tanto para as amostras naturais como as despectinizadas. Os

valores da energia de ativação variam entre 3,99 ó 4,54 kcal.g.mol⁻¹ para as amostras naturais e 4,27 ó 4,89 kcal.g.mol⁻¹ para as amostras despectinizadas.

É possível verificar que há uma diminuição da energia de ativação com a redução do tamanho das partículas presentes nas amostras analisadas (Tabela 16). Silva, Guimarães, Gasparetto (2005) ao analisar o suco de acerola, verificaram que numa concentração de 4°Brix a energia de ativação é de 3,50 kcal.g.mol⁻¹ e a 16°Brix é de 1,79 kcal.g.mol⁻¹, indicando que ocorre uma redução dos valores da energia de ativação com o aumento da quantidade de sólidos solúveis do suco de acerola, comportamento este visto somente para o suco concentrado de maracujá e para polpas de frutas.

Zuritz et al. (2005) observaram que ao aumentar a concentração de sólidos no suco de uva de 22,9°Brix para 45°Brix, a energia de ativação aumentou de 3,9 kcal.g.mol⁻¹ para 5,3 kcal.g.mol⁻¹, havendo um aumento nos valores da energia de ativação com o aumento da concentração de sólidos (°Brix) presentes para as amostras do suco de uva.

5.3.3 Efeito do tratamento enzimático

As Figuras 22 e 23 indicam o efeito do tratamento enzimático sobre o comportamento reológico das amostras do suco de abacaxi ajustadas pelo modelo de Mizrahi-Berk a 50°C.

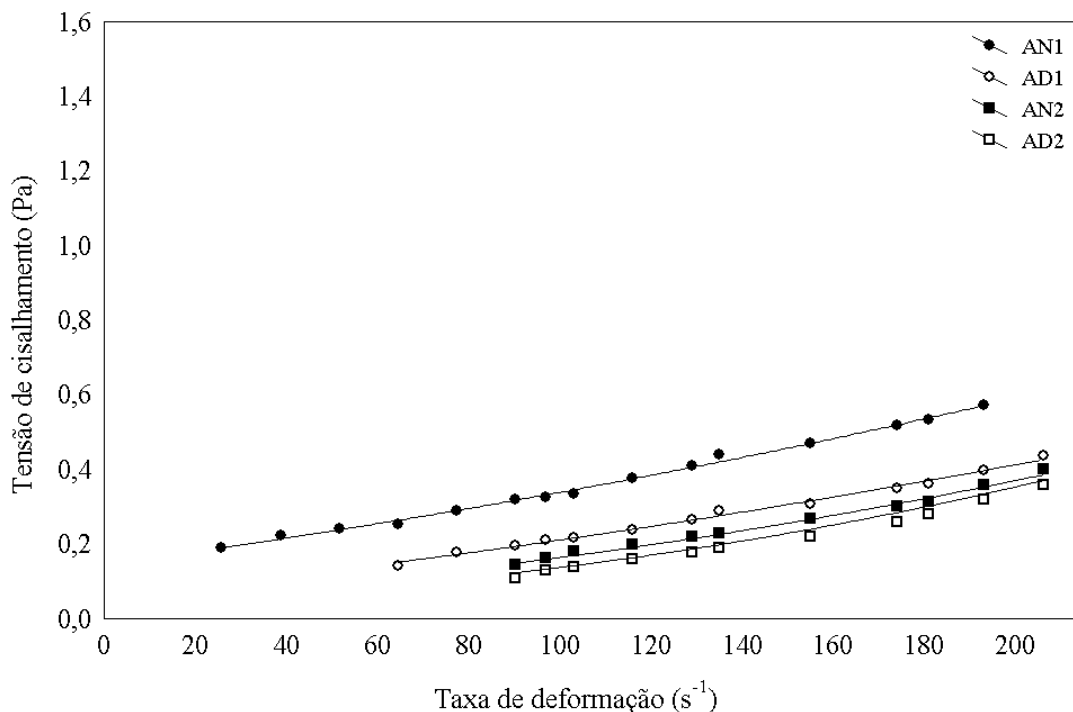


Figura 22. Influência do tratamento enzimático sobre as amostras 1 e 2, ajustadas pelo modelo de Mizrahi-Berk a 50°C.

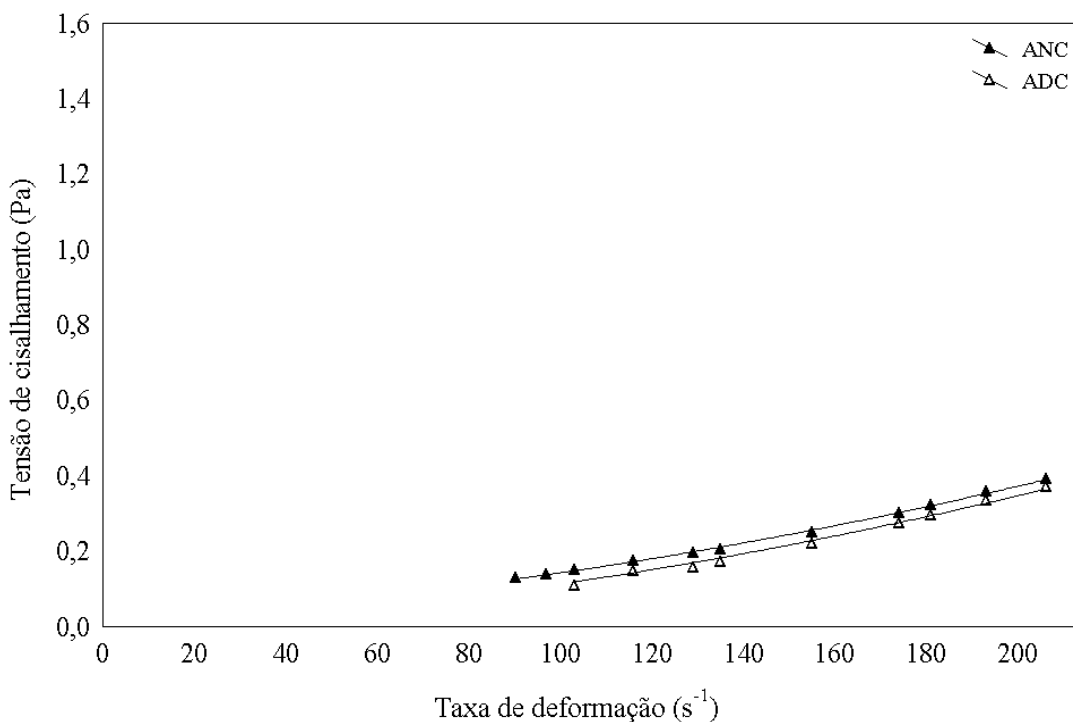


Figura 23. Influência do tratamento enzimático sobre as amostras centrifugadas ajustadas pelo modelo Mizrahi-Berk a 50°C.

Verifica-se para todas as amostras uma redução nos parâmetros de comportamento reológico, em função da atuação das enzimas pectinolíticas, que ocasionaram a hidrólise da pectina presente nas amostras do suco de abacaxi, alterando a estrutura das mesmas pela redução do tamanho das macromoléculas ao longo do tempo de tratamento. A Tabela 18 mostra o percentual de redução da viscosidade aparente dos sucos analisados.

Tabela 18. Percentual de redução da viscosidade das amostras do suco de abacaxi a uma taxa de deformação de 103s^{-1} e 10°C .

Amostras	η (Pa.s) amostra natural	η (Pa.s) amostra despectinizada	% redução
Amostra 1	0,0089	0,0057	34,1
Amostra 2	0,0044	0,0035	22,2
A. centrifugada	0,0035	0,0028	22,2

Esses valores estão próximos aos encontrados por Barros, Mendes, Peres (2004), que avaliaram a influência da despectinização na ultrafiltração dos sucos de cereja e abacaxi, e observaram uma redução na viscosidade de 22,3% para o suco de cereja e 30% para o suco de abacaxi, em função da redução no peso molecular das pectinas, celulosas e hemicelulosas com o decorrer do tempo de tratamento. Com 50 minutos de tratamento, 80% do total de pectina do suco de cereja e 30% do total de pectina do suco de abacaxi, haviam sido despolimerizados, comprovando a eficiência da utilização das enzimas para a hidrólise da pectina.

Sá, Cabral, Matta (2003) analisaram a concentração de suco de abacaxi através dos processos com membranas, e verificaram que o tratamento enzimático introduzido ao processamento com o objetivo de melhorar o desempenho do processo de filtração reduziu significativamente a viscosidade do suco hidrolisado em relação ao suco integral em cerca de 22%, sendo este valor bem próximo ao encontrado para o suco de abacaxi analisado.

Queiroz, Vidal, Gasparetto (2000), verificaram que com a despectinização, a eliminação total dos sólidos insolúveis suspensos com a centrifugação, reduziu a viscosidade aparente da fração centrifugada para menos de 1/19 do valor da viscosidade aparente da polpa integral, a uma taxa de deformação de 300s^{-1} . Para o suco de abacaxi analisado neste trabalho, o tratamento enzimático aliado à centrifugação proporcionou um percentual de redução da viscosidade de 22,2%.

Vaillant et al. (2001) estudaram o processo de clarificação de sucos e polpas de frutas, visando obter um produto transparente e homogêneo. O uso de enzimas reduziu a viscosidade do suco, como visto para as amostras do suco de abacaxi. Esse resultado facilitou a operação de filtração. Além disso, a baixa viscosidade favoreceu a troca de calor durante os tratamentos térmicos, confirmando a eficiência da utilização das enzimas pectinolíticas na indústria de sucos de frutas.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se chegar as seguintes conclusões:

- As amostras do suco de abacaxi apresentaram, em sua maioria, um comportamento não-newtoniano (pseudoplástico);
- O modelo de Mizrahi-Berk foi o que melhor descreveu o comportamento reológico das amostras do suco de abacaxi natural e despectinizado em todas as faixas de temperatura utilizadas;
- Os valores do índice de consistência (K) e do índice de comportamento (n), não apresentaram uma tendência de comportamento com o aumento da temperatura;
- A viscosidade aparente obtida pelo modelo de Mizrahi-Berk diminuiu com o aumento da temperatura e da taxa de deformação, sendo este comportamento observado em todas as amostras analisadas (naturais e despectinizadas);
- A equação de Arrhenius representou bem o efeito da temperatura na viscosidade aparente do suco de abacaxi, sendo que os valores da energia de ativação a uma taxa de deformação constante de 103s^{-1} foram maiores para as amostras despectinizadas, indicando que a viscosidade aparente dessas amostras tem a sua estrutura molecular possivelmente influenciada pelo aumento da temperatura.
- O tamanho das partículas presentes influenciou o comportamento reológico das amostras analisadas, sendo que os produtos centrifugados apresentaram uma redução na viscosidade aparente (medida a uma taxa de deformação de 103 s^{-1}) de 60% e 55,81%, respectivamente para as amostras do suco de abacaxi natural e despectinizado.
- Houve uma redução da energia de ativação com a diminuição do tamanho das partículas presentes nas amostras.
- Os resultados obtidos na análise de variância dos testes preliminares do tratamento enzimático indicaram que as variáveis, temperatura e o tempo de tratamento exerceram efeito estatisticamente significativo ($p < 0,05$) sobre a resposta;
- O tratamento enzimático reduziu a viscosidade das amostras do suco de abacaxi em todas as faixas de temperatura utilizadas. O percentual de redução foi de 34.1% para a amostra 1, 22.2% para a amostra 2 e 22.2% para a amostra centrifugada a 10°C .

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADA - Agência de desenvolvimento da Amazônia. Potencial da fruticultura: sistemas agroflorestais sustentáveis. Disponível em: <<http://www.ada.gov.br>>. Acesso em: 14 nov.2005.
- ALKORTA, I.; GARBISU, C.; LLAMA, M.J.; SERRA, J.L. Industrial applications of pectic enzymes: a review. **Process Biochemistry**, v.33, n.1, p.21-28, 1998.
- ALPARSLAN, M.; HAYTA, M. Rheological and sensory properties of pekmez (grape molasses)/tahin (sesame paste) blends. **Journal of Food Engineering**, v.54, n.1, p.89-93, 2002.
- ALVARENGA, M. B. Desenvolvimento de plano APPCC para linha de suco de abacaxi envasado assepticamente. In: IV SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DE ALIMENTOS. **Resumos**: Sociedade Brasileira de Ciência e tecnologia de Alimentos, Campinas/SP, v.1, p.322, 2001.
- AMIN, M.M.; BOULHOSA, R.L.M. **Uma abordagem sobre a indústria de beneficiamento do abacaxi no estado do Pará**, Belém-PA, 2002.
- AOAC ó **Association of Official Analytical Chemistry**. Official methods of analysis, Washington DC, 1997.
- BALISCHI, L.; PEREIRA, N.C.; LIMA, O.C.M.; BARROS, S.T.D.; DAMASCENO, J.W.; MENDES, E.S. Influência do tratamento enzimático sobre as características reológicas e microscópicas da polpa de acerola. **Acta Scientiarum**, v.24, n.6, p.1649-1658, 2002.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G.V.; IBARZ, A.; PELEG, M. Propriedades reológicas de alimentos fluidos. **Revisión Alimentaria**, n.241, p.39-49, 1993.
- BARNES, H.A. The yield stress ó a review or $\pi\alpha\nu\tau\alpha$ $\rho\epsilon\iota\theta$ ó everything flows. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v.81, n.1-2, p.133-178, 1999.
- BARNES, H.A.; HUTTON, J.F.; WALTERS, K. An introduction to rheology. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v.32, n.3, p.331-333, 1989.
- BARROS, S.T.D. **Clarificação dos sucos de acerola e abacaxi por ultrafiltração: modelagem e simulação do fluxo de permeado e determinação dos mecanismos de Fouling**. 2002. Tese de Doutorado ó DTP/UNICAMP, Campinas, 2002.
- BARROS, S.T.D.; MENDES, E.S.; PERES, L. Influence of depectinization in the ultrafiltration of west indian cherry (*Malpighia glabra* L.) and pineapple (*Ananas comosus* L.) juices. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.24, n.2, p.194-201, 2004.
- BHAT, M.K. Cellulases and related enzymes in biotechnology. **Biotechnology Advances**. New York: Elsevier, cap.29, p.355-383, 2000.
- BRANDÃO, E.M.; ANDRADE, C.T. Influência de fatores estruturais no processo de gelificação de pectinas de alto grau de metoxilação. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v.9, n.3, p.38-44, 1999.

CASTRO, A.G. **A química e a reologia no processamento de alimentos**. Instituto Piagete, Ciência e técnica, 2003.

CONSTENLA, D.T.; LOZANO, J.E.; CRAPISTE, G.H. Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature. **Journal of Food Science**, v.54, n.3, p.663-668, 1989.

FERGUSON, J.; KEMBLOWSKI, Z. **Applied fluid rheology**. New York: Elsevier Applied Science, 323p., 1991.

FERREIRA, E.V.; BRANDÃO, P.R.G.; KLEIN, B.; PERES, A.E.C. Reologia de suspensões minerais: uma revisão. **Revista Escola de Minas**, v.58, n.1, p.83-87, 2005.

FERREIRA, G. M.; QUEIROZ, A. J. M.; CONCEIÇÃO, R. S.; GASPARETTO, C. A. Efeito da temperatura no comportamento reológico das polpas de cajú e goiaba. **Revista de Ciências Exatas e Naturais**, v.4, n.2, p.175-184, 2002.

FRANCO, G. **Tabela de composição química dos alimentos**, Rio de Janeiro: Atheneu, 230p, 1989.

FREITAS, I.C. **Estudo das interações entre biopolímeros e polpas de frutas tropicais em cisalhamento estacionário e oscilatório**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - FEA/UNICAMP, Campinas, 2002.

GOMES, E.; GUEZ, M.A.U.; MARTIN, N.; SILVA, R. Enzimas termoestáveis: fontes, produção e aplicação industrial. **Química Nova**, v.30, n.1, p.136-145, 2006.

GUIMARÃES, D.H.P.; GASPARETTO, C.A. Rheological Behavior of Pineapple and Mango Pulps: effect of the measuring systems. **Revista de ciência & tecnologia**, v.8, n.16, p.91-96, 2000.

GUMMADI, S.N.; PANDA, T. Purification and biochemical properties of microbial pectinases: a review. **Process biochemistry**, n.38, p.987-996, 2003.

HASSAN, B. H., & HOBANI, A. I. Flow properties of Roselle (*Hibiscus sabdariffa*) extract. **Journal of Food Engineering**, v.35, n.4, p.459-470, 1998.

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

HUBER, D.J. Polyuronide degradation and hemicelulose modification in ripening tomato fruit. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.108, n.3, p.405-409, 1983.

ITAL (Instituto de tecnologia de alimentos). **Processamento de compotas, doces em massa e geléias**: Fundamentos básicos. Manual Técnico, nº16, Campinas, 1999.

JANSER, E. Enzyme applications for tropical fruits and citrus. **Fruit processing**. v.10, n.6, p.388-393, 1997.

JIMEMES, G. & DURAN, L. Propriedades reológicas de produtos derivados de frutas y tomate. **Revista de agroquímica y tecnología de alimentos**, Valência, v.19, n.2, p.203-216, 1979.

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

KHALIL, K.E., RAMAKRISHNA, P., NANJUNDASWAMY, A.M., PATWARDHAN, M.V. Rheological behaviour of clarified banana juice: effect of temperature and concentration. **Journal of Food Engineering**, v.10, n.3, p.231-240, 1989.

LEHNINGER, A. L.; NELSON, D. L.; COX, M. M. **Princípios de Bioquímica**. São Paulo: Sarvier, 839p, 1995.

LIMA, R.M.F.; LUZ, J.A.M. Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes. **Revista Escola de Minas**, v.54, n.2, Ouro Preto, 2001.

MACHADO, J.C.V. **Reologia e escoamento de fluidos: Ênfase na indústria do petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 258p., 2002.

MATISSEK, R.; SCHNEPEL, F.; STEINER, G. **Análisis de los alimentos: fundamentos, métodos e apliciones.**, Zaragoza: Acribia, 1998.

MEDINA, J.C; BLEINROTH, E.W.; MARTIN, Z.J.; SOUZA, A.J.; LARA, J.C.C.; HASHIZUME, T. Abacaxi: da Cultura ao processamento e Comercialização. **ITAL**, Governo do Estado de São Paulo, p.5-14, 1978.

MERCÊ, A.L.R.; FERNANDESA, E.; MANGRICHA, A.S.; SIERAKOWSKIA, M. R.; SZPOGANICZ, B. Fe (III) - Galactomannan Solid and Aqueous Complexes. Potentiometric, EPR Spectroscopy and Thermal Data. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v.12, n.6, p.791-798, 2001.

MILLER, G.L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical Chemistry**, v.11, p.426-428, 1959.

MIZRAHI, S.; BERK, Z. Flow behavior of concentrated orange juice: mathematical treatments. **Journal of Texture Studies**, v.3, n.1, p.69-79, 1971.

MORAIS, J.L.; CASTRO, A.G.; DIOGO, A.C. **Noções básicas de reologia**, Instituto Piaget, Ciência e Técnica., 2001.

NAGY, S., CHEN, C. S., SHAW, P. E. **Fruit juice processing technology**. Albuquerque: Agscience, Flórida, 713p, 1993.

PELEGRIE, D.H.; VIDAL, J.R.M.B.; GASPARETTO, C.A. Estudo da viscosidade aparente das polpas de manga (Keitt) e abacaxi (Pérola). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.20, n.1, p.128-131, 2000.

PETRUS, J.C.C. **Preparação, modificação e caracterização de membrana assimétrica para clarificação de suco de frutas**. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - FEA/UNICAMP, Campinas, 1997.

PINHEIRO, A.M.; FERNANDES, A.G.; FAI, A.E.C.; PRADO, G.M.; SOUSA, P.H.M.; MAIA, G.A. Avaliação química, físico-química e microbiológica de sucos de frutas integrais: abacaxi, caju e maracujá. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.26, n.1, p.98-103, 2006.

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

QUEIROZ, A.J.M.; VIDAL, J.R.M.B.; GASPARETTO, C.A. Influência dos sólidos suspensos na reologia do suco de abacaxi. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 1996, Uberlândia. **Anais**. Uberlândia, 1996.

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

RAO, M.A. Rheology of liquids foods ó A Review. **Journal of Texture Studies**, v.8, p.135-168, 1977.

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

RAYMUNDO, A.; EMPIS, J.; SOUSA, I. Optimization of lupin protein emulsion composition. **Journal Nutrition Science**, v.7, n.48, p.127, 1998.

SÁ, I.S.; CABRAL, L.M.C.; MATTA, V.M. Concentração de suco de abacaxi através dos processos com membranas. Braz. **Journal of Food Technology**, v.6, n.1, p.53-62, 2003.

SAGRI ó PA. Culturas de destaque no estado Pará - ano 2004. Disponível em: <<http://www.sagri.pa.gov.br>>. Acesso em: 17 nov. 2005.

SARZI, B.; DURIGAN, J.F. Avaliação física e química de produtos minimamente processados de abacaxi ôpérolaö. **Revista Brasileira de Fruticultura.**, Jaboticabal, v.24, n.2, p.333-337, 2002.

SATO, A.C.K. **Influência do tamanho de partículas no comportamento reológico da polpa de jaboticaba**. 2005, 73p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2005.

SERRALHA, F. Enzimas. In: CASTRO, A.G. **A química e a reologia no processamento de alimentos**. Instituto Piaget, p. 37-60, 2003.

SERVAIS, C.; JONES, R.; ROBERTS. The influence os particle size distribution on the processing of food. **Journal of Food Engeneering**, v.51, p.201-208, 2002.

SHARMA, S.K.; LEMAGUER,M.; LIPTAY,A.; POYSA,V. Effect of composition on the rheological properties of tomato thin pulp. **Food Research International**, v.29, p.175-179, 1996.

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

SILVA, F.C.; GUIMARÃES, D.H.P.; GASPARETTO, C.A. Reologia do suco de acerola: efeitos da concentração e temperatura. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.25, n.1, p.121-126, 2005.

SILVA, S.P. **Frutas no Brasil**, São Paulo: Nobel, 2001.

SINGH, R.P.; HELDMAN, D.R. **Introducción a la ingeniería de los alimentos**. Zaragoza: Acribia, 544p, 1997.

SOLER, M.P. **Como fazer doce de abacaxi e araçá**, Brasília:IBICT, NUTEC, 1993.

SOUTO, R.F. Conservação pós-colheita de abacaxi -Pérolaøcolhido no estágio de maturação õ pintadoõ, associando-se refrigeração e atmosfera modificada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.26, n.1, 2004.

STEFFE, J. F. **Rheological Methods in Food Process Engineering**, East Lansing: FreemanPress, 418p, 1996.

SUGAI, A.Y.; TADINI, C.C.; TRIBESS, T.B. Influência da temperatura do tratamento térmico sobre os parâmetros reológicos do purê de manga (*Mangifera indica L.*) variedade Haden. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos, 18, 2002, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre, p.1857-1860, 2002.

Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO). NEPA-UNICAMP, 2.ed., Campinas-SP, 113p., 2006.

TORALLES, R.P.; VENDRUSCOLO, J.L.; VENDRUSCOLO, C.T. Reologia do purê Homogeneizado de pêssego: Efeito da temperatura e concentração. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.9, n.1, p.1-8, 2006.

VAILLANT, F.; MILLAN, A.; DORNIER, M.; DECLOUX, M.; REYNES, M. Strategy for economical optimization of the clarification of pulpy fruit juices using crossflow microfiltration. **Journal of Food Engineering**, v.48, p.83-90, 2001.

VALENCIA, C.; SÁNCHEZ, M.C.; CIRUELOS, A.; LATORRE, A.; FRANCO, J.M.; GALLEGOS, C. Linear viscoelasticity of tomate sauce products: influence of previous tomato paste processing. **European Food Research Technology**, v.214, p.394-399, 2002.

VIDAL, J.R.M.B. **Comportamento reológico da polpa de manga (*Mangífera indica L-Keitt*)**. 2000, 159p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2000.

VIDAL, J.R.M.B. **Estudo reológico do suco de manga ó Efeito dos sólidos insolúveis**. 1997, 81p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 1997.

VIDAL, J.R.M.B.; PELEGRINE, D.H.; GASPARETTO, C.A. Efeito da temperatura no comportamento reológico da polpa de manga (*Mangífera indica L-keitt*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.24, n.1, p.39-42, 2004.

WHITAKER JR. Microbial pectinolytic enzymes. **Microbial enzymes and biotechnology**, London, p. 1336176, 1990.

ZAMBIAZI, R.C.; MENDONÇA, C.R.B.; GRANADA, G.G. Abacaxi: Produção, mercado e subprodutos. **Boletim Centro de Pesquisas e Processamento de Alimentos**. v.22, n.2, p.405-422, 2004.

ZURITZ, C.A.; PUNTES, E.M.; MATHEY, H.H.; PÉREZ, E.H.; GASCÓN, A.; RUBIO, L.A.; CARULLO, C.A.; CHERNIKOFF, R.E.; CABEZA, M.S. Density, viscosity and coefficient of thermal expansion of clear grape juice at different soluble solid concentrations and temperatures. **Journal of Food Engineering**, n.71, p.1436149, 2005.

ANEXOS

ANEXO A

Resultados do ajuste dos modelos aos dados experimentais das amostras naturais.

Tabela A.1: Parâmetros do modelo de Mizrahi-Berk para a amostra AN2 do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
K_{0M}	0,0259	-0,3245	0,2119	0,1368
K_M	0,0611	0,2128	0,0016	0,0018
nM	0,5110	0,3076	1,0373	1,0454
R^2	0,9994	0,9970	0,9886	0,9892
χ^2	3×10^{-5}	6×10^{-5}	0,0001	0,0001
SQR	0,0004	0,0006	0,0008	0,0006
B_f	0,9994	1,0003	0,9981	0,9946
EP	0,0054	0,0072	0,0089	0,0088

Tabela A.2: Parâmetros do modelo Lei da potência para a amostra AN2 do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
k	0,0048	0,0038	0,0007	0,0001
n	0,9843	0,9508	1,1898	1,5070
R^2	0,9994	0,9962	0,9834	0,9851
χ^2	3×10^{-5}	0,0001	0,0001	0,0001
SQR	$3,8 \times 10^{-4}$	0,0008	0,0012	0,0008
B_f	0,9987	1,0036	0,9967	0,9948
EP	0,0054	0,0081	0,0107	0,0103

Tabela A.3: Parâmetros do modelo de Casson para a amostra AN2 do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
K (Pa.s ⁿ)	0,0657	0,0522	0,0491	0,0590
R ²	0,9993	0,9959	0,9818	0,9804
²	3 x 10 ⁻⁵	8 x 10 ⁻⁵	0,0001	0,0002
SQR	0,00038	0,00084	0,0013	0,0011
B _f	0,9991	1,0032	0,9975	0,9955
EP	0,0054	0,0084	0,0112	0,0118

Tabela A.4: Parâmetros do modelo de Mizrahi-Berk para a amostra ANC do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
K _{0M}	0,0229	0,0801	0,1424	-0,3135
K _M	0,0484	0,0252	0,0025	0,0565
n _M	0,5371	0,6057	0,9894	0,5220
R ²	0,9995	0,9990	0,9980	0,9991
²	2 x 10 ⁻⁵	2 x 10 ⁻⁵	2 x 10 ⁻⁵	1 x 10 ⁻⁵
SQR	2,6 x 10 ⁻⁴	1,7 x 10 ⁻⁴	1,7 x 10 ⁻⁴	4 x 10 ⁻⁵
B _f	1,0008	1,0003	0,9966	1,1597
EP	0,0043	0,0038	0,0041	0,0025

Tabela A.5: Parâmetros do modelo Lei da potência para a amostra ANC do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
k	0,0030	0,0020	0,0002	4x10 ⁻⁵
n	1,0362	1,0390	1,3981	1,7200
R ²	0,9995	0,9988	0,9953	0,9988
²	2 x 10 ⁻⁵	2 x 10 ⁻⁵	4 x 10 ⁻⁵	1 x 10 ⁻⁵
SQR	2,7 x 10 ⁻⁴	0,0002	0,0004	6 x 10 ⁻⁵
B _f	0,9999	0,9993	0,9949	1,0010
EP	0,0044	0,0040	0,0063	0,0029

Tabela A.6: Parâmetros do modelo de Casson para a amostra ANC do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
K (Pa.s ⁿ)	0,0621	0,0512	0,0561	0,0659
R ²	0,9994	0,9987	0,9924	0,9990
²	2×10^{-5}	2×10^{-5}	7×10^{-5}	1×10^{-5}
SQR	$2,9 \times 10^{-4}$	$2,1 \times 10^{-4}$	$6,4 \times 10^{-4}$	5×10^{-5}
B _f	0,9994	0,9994	0,9950	0,9995
EP	0,0046	0,0042	0,0080	0,0025

ANEXO B

Resultados do ajuste dos modelos aos dados experimentais das amostras despectinizadas.

Tabela B.1: Parâmetros do modelo de Mizrahi-Berk para a amostra AD2 do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
K_{0M}	0,0094	-0,0021	0,2016	-0,2687
K_M	0,0589	0,0506	0,0006	0,0389
nM	0,4986	0,4903	1,2142	0,5822
R^2	0,9996	0,9989	0,9833	0,9973
σ^2	1×10^{-5}	2×10^{-5}	0,0002	3×10^{-5}
SQR	$1,6 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-4}$	0,0013	$1,4 \times 10^{-4}$
B_f	0,9998	1,0001	0,9908	0,9984
EP	0,0035	0,0037	0,0114	0,0044

Tabela B.2: Parâmetros do modelo Lei da potência para a amostra AD2 do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
k	0,0038	0,0025	0,0002	0,0000
n	0,9822	0,9846	1,4046	1,8236
R^2	0,9996	0,9989	0,9706	0,9981
σ^2	1×10^{-5}	1×10^{-5}	0,0003	2×10^{-5}
SQR	$1,6 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-4}$	0,0023	1×10^{-4}
B_f	0,9995	1,0002	0,9892	0,9995
EP	0,0035	0,0037	0,0151	0,0037

Tabela B.3: Parâmetros do modelo de Casson para a amostra AD2 do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
K (Pa.s ⁿ)	0,0583	0,0473	0,0544	0,0688
R ²	0,9995	0,9989	0,9641	0,9968
²	1 x 10 ⁻⁵	1 x 10 ⁻⁵	0,0003	3 x 10 ⁻⁵
SQR	1,6 x 10 ⁻⁴	1,7 x 10 ⁻⁴	0,0028	1,6 x 10 ⁻⁴
B _f	0,9999	1,0003	0,9919	0,9980
EP	0,0035	0,0037	0,0166	0,0047

Tabela B.4: Parâmetros do modelo de Mizrahi-Berk para a amostra ADC do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
K _{0M}	-0,0103	0,1089	0,0418	-1,2472
K _M	0,0474	0,0162	0,0049	0,5643
nM	0,5292	0,6576	0,8921	0,2193
R ²	0,9996	0,9981	0,9856	0,9972
²	1 x 10 ⁻⁵	2 x 10 ⁻⁵	0,0001	2 x 10 ⁻⁵
SQR	1,2 x 10 ⁻⁴	2 x 10 ⁻⁴	0,0009	1 x 10 ⁻⁴
B _f	1,0001	0,9997	0,9931	1,0005
EP	0,0030	0,0041	0,0104	0,0038

Tabela B.5: Parâmetros do modelo Lei da potência para a amostra ADC do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
k	0,0020	0,0017	0,0001	0,0001
n	1,0766	1,0329	1,6426	1,6095
R ²	0,9996	0,9977	0,9844	0,9954
²	1 x 10 ⁻⁵	2 x 10 ⁻⁵	0,0001	3 x 10 ⁻⁵
SQR	1,2 x 10 ⁻⁴	2,5 x 10 ⁻⁴	0,0009	1,7 x 10 ⁻⁴
B _f	1,0005	0,9980	0,9927	1,0027
EP	0,0030	0,0045	0,0108	0,0049

Tabela B.6: Parâmetros do modelo de Casson para a amostra ADC do suco de abacaxi.

Parâmetros	Temperatura (°C)			
	10	25	50	65
K (Pa.s ⁿ)	0,0577	0,0459	0,0624	0,0596
R ²	0,9995	0,9975	0,9779	0,9967
²	1 x 10 ⁻⁵	2 x 10 ⁻⁵	0,0002	2 x 10 ⁻⁵
SQR	1,2 x 10 ⁻⁴	2,6 x 10 ⁻⁴	0,0013	1,2 x 10 ⁻⁴
B _f	0,9995	0,9983	0,9934	1,0014
EP	0,0031	0,0046	0,0128	0,0041