

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS  
LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA APROPRIADA**

**PROPRIEDADES REOLÓGICAS  
DE DOCE DE BANANA**

**PAULO FERRAZ DE TOLEDO**

Engenheira de Alimentos – UNICAMP

**Orientador:** Prof. Dr. Celso Costa Lopes

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

**Campinas**

**2004**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA F.E.A. – UNICAMP

T575 Toledo, Paulo Ferraz de  
Propriedades reológicas de doce de banana / Paulo Ferraz de  
Toledo. – Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientador: Celso Costa Lopes  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de  
Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1.Banana. 2.Viscoelasticidade. 3.Modelo de Maxwell. 4.  
Modelo de Peleg. 5.Sacarose. I.Lopes, Celso Costa.  
II.Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia  
de Alimentos. III.Título.

CARS

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Celso Costa Lopes**  
(Orientador)

---

**Profa. Dra. Rosiane Lopes da Cunha**  
(Membro)

---

**Prof. Dr. Carlos Raimundo F. Grosso**  
(Membro)

---

**Prof. Dr. Luis Antonio Viotto**  
(Suplente)

## **AGRADECIMENTOS**

*À minha família: meu pai Cyro Octávio, minha mãe Maria José, meus irmãos Flávia, Cláudio e Renata, meus sobrinhos Rodrigo e Marina pelo apoio para seguir neste trabalho sob difíceis condições.*

*Ao Prof. Dr. Celso Costa Lopes pela orientação e incentivo durante a realização do trabalho.*

*À Prof. Dra. Rosiane Lopes da Cunha pela colaboração e orientações fundamentais na realização do trabalho.*

*À banca examinadora pela atenção, correção e sugestões no sentido de melhorar a qualidade deste trabalho*

*Aos funcionários do Laboratório de Engenharia de Processos, da Planta Piloto do Departamento de Tecnologia de Alimentos, do Laboratório de Análise de Alimentos e do Laboratório de Análise Sensorial.*

*Às colegas de laboratório Jacqueline e Kelly, aos colegas de turma que num momento ou outro estiveram ao meu lado durante esses anos, à Paula e aos amigos de todas as horas Caçapa, Carolina, Samarone, César, Olga, Vilene e Rachel.*

*Aos amigos e colegas de Piracicaba, Campinas, Livramento, Bastos, Pirassununga, Lins e Ituiutaba.*

## SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABELAS.....	viii
NOMENCLATURA.....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Banana.....	3
2.2. Doces de Fruta.....	7
2.3. Medidas de Textura em Alimentos.....	8
2.4. Tipos de Testes.....	9
2.5. Tipos de Instrumentos.....	9
2.6. Reologia e Viscoelasticidade.....	11
2.6.1. Modelos Matemáticos.....	12
2.6.1.1. Modelo de Maxwell.....	12
2.6.1.2. Modelo de Maxwell Generalizado.....	16
2.6.1.3. Modelo de Peleg & Normand.....	17
2.6.2. Teste de Ruptura.....	17
3. Material e Métodos.....	24
3.1. Matéria-Prima.....	24
3.1.1. Polpa de Banana.....	24
3.1.2. Sacarose.....	25
3.1.3. Açúcar Invertido.....	25
3.1.4. Ácido Cítrico.....	25
3.2. Processamentos.....	25
3.3. Análises Físico-Químicas.....	27
3.3.1. Textura.....	27
3.3.1.1. Teste de Relaxação de Tensão.....	27

3.3.1.2. Teste de Ruptura por Compressão.....	27
3.3.2. Análises Físico-Químicas.....	28
3.3.2.1. Açúcares Redutores e Sacarose.....	28
3.3.2.2. Umidade.....	28
3.3.2.3. Atividade de Água.....	28
3.4. Análise Sensorial.....	29
4. Resultados e Discussão.....	31
4.1. Composição dos produtos.....	31
4.2. Comportamento Reológico.....	34
4.2.1. Teste de Relaxação de Tensão.....	34
4.2.1.1. Modelos de Maxwell.....	35
4.2.1.1.1. Efeito da Sacarose.....	37
4.2.1.1.2. Efeito do Açúcar Invertido.....	38
4.2.1.1.3. Efeito do Ácido Cítrico.....	39
4.2.1.1.4. Efeito da Umidade e Atividade de Água.....	40
4.2.1.2. Modelo de Peleg & Normand.....	43
4.2.1.2.1. Efeito da Sacarose.....	44
4.2.1.2.2. Efeito do Açúcar Invertido.....	44
4.2.1.2.3. Efeito do Ácido Cítrico.....	45
4.2.1.2.4. Efeito da Umidade e Atividade de Água.....	45
4.2.2. Teste de Ruptura por Compressão.....	46
4.3. Análise Sensorial.....	47
5. Conclusões.....	49
6. Sugestões para Futuros Trabalhos.....	50
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
APÊNDICE.....	56

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b> Fluxograma do processo de doce de banana em massa ou bananada	6
<b>Figura 2.2:</b> Representação esquemática do Modelo de Maxwell	12
<b>Figura 2.3:</b> Curvas de relaxação de tensão	14
<b>Figura 2.4:</b> Curva típica obtida de teste de relaxação de tensão para um modelo de Maxwell com uma mola em paralelo	15
<b>Figura 2.5:</b> Representação esquemática do Modelo de Maxwell Generalizado	16
<b>Figura 2.6:</b> Curvas de relaxação de tensão normalizadas	20
<b>Figura 3.1</b> Fluxograma de extração de açúcares para análise de teor de açúcares redutores e sacarose	30
<b>Figura 4.1:</b> Teores médios de umidade e atividade de água	32
<b>Figura 4.2:</b> Teor médio de açúcares redutores e sacarose	33
<b>Figura 4.3:</b> Curvas de relaxação de tensão dos produtos	34
<b>Figura 4.4:</b> Curvas de relaxação de tensão normalizadas dos produtos	35
<b>Figura 4.5:</b> Módulos de elasticidade dos produtos	39
<b>Figura 4.6:</b> Módulos de viscosidade dos produtos	40
<b>Figura 4.7:</b> Módulos de elasticidade e teor de umidade dos produtos	41
<b>Figura 4.8:</b> Módulos de elasticidade e atividade de água dos produtos	41
<b>Figura 4.9:</b> Tempo de relaxação e teor de umidade dos produtos	42
<b>Figura 4.10:</b> Tempo de relaxação e atividade de água dos produtos.	42
<b>Figura 4.11:</b> Força na compressão em função da deformação aplicada	46
<b>Figura 4.12:</b> Parâmetro $k_1$ do modelo de Peleg & Normand e médias das notas de textura táctil dos produtos	48

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 2.1:</b> Composição química de variedades de banana	4
<b>Tabela 2.2:</b> Teores de amido, glicose e sacarose na polpa de banana Pai Antonio	5
<b>Tabela 2.3:</b> Substituição mínima de sacarose para evitar cristalização	8
<b>Tabela 3.1.</b> Características físico-químicas da polpa de banana utilizada nos processamentos	24
<b>Tabela 3.2:</b> Formulações utilizadas nos processamentos	26
<b>Tabela 4.1:</b> Teores de umidade e atividade de água	31
<b>Tabela 4.2:</b> Teores de açúcares redutores e sacarose	33
<b>Tabela 4.3:</b> Parâmetros para o modelo de Maxwell	36
<b>Tabela 4.4:</b> Parâmetros para o modelo de Maxwell de 5 elementos	36
<b>Tabela 4.5:</b> Parâmetros para o modelo de Maxwell de 7 elementos	37
<b>Tabela 4.6:</b> Parâmetros para o modelo de Peleg & Normand	43
<b>Tabela 4.7:</b> Valores de $R^2$ para os modelos matemáticos testados	45
<b>Tabela 4.8:</b> Médias das notas da avaliação sensorial dos produtos	47

## NOMENCLATURA

$\sigma$ :	tensão (Pa)
$\sigma_e$ :	tensão de equilíbrio (Pa)
$\sigma_0$ :	tensão inicial (Pa)
$\sigma_\eta$ :	tensão do elemento viscoso do modelo de Maxwell (Pa)
$\sigma_E$ :	tensão do elemento elástico do modelo de Maxwell (Pa)
$E$ :	módulo de elasticidade (Pa)
$E_e$ :	constante de elasticidade do modelo de Maxwell (Pa)
$E_1$ :	constante de elasticidade do modelo de Maxwell (Pa)
$E_2$ :	constante de elasticidade do modelo de Maxwell (Pa)
$E_3$ :	constante de elasticidade do modelo de Maxwell (Pa)
$\varepsilon$ :	deformação (mm)
$\dot{\varepsilon}$ :	taxa de deformação (mm/s)
$\varepsilon_\eta$ :	deformação do elemento viscoso (mm)
$\varepsilon_E$ :	deformação do elemento elástico (mm)
$\varepsilon_0$ :	deformação inicial (mm)
$\eta$ :	viscosidade (Pa.s)
$\eta_1$ :	constante de viscosidade do modelo de Maxwell (Pa.s)
$\eta_2$ :	constante de viscosidade do modelo de Maxwell (Pa.s)
$\eta_3$ :	constante de viscosidade do modelo de Maxwell (Pa.s)
$\lambda_{rel}$ :	tempo de relaxação (s)
$\lambda_1$ :	tempo de relaxação do modelo de Maxwell(s)
$\lambda_2$ :	tempo de relaxação do modelo de Maxwell(s)
$\lambda_3$ :	tempo de relaxação do modelo de Maxwell(s)
$t$ :	tempo (s)
$A_w$ :	Atividade de água
$k_1$ :	constante do modelo de Peleg & Normand (s)
$k_2$ :	constante do modelo de Peleg & Normand
$F$ :	força (N)

## Resumo

Neste trabalho foram determinadas as propriedades reológicas do doce de banana em massa produzido com diferentes formulações contendo ou não sacarose, açúcar invertido e ácido cítrico. As concentrações destes ingredientes atenderam as exigências da certificação orgânica. Os ingredientes foram misturados no início do processo e a etapa de concentração foi realizada num tacho encamisado à pressão atmosférica até a concentração de sólidos solúveis de 74º Brix, com exceção das formulações sem sacarose cujas concentrações foram de 55º Brix. Foram realizados os testes reológicos de compressão: ruptura e relaxação da tensão. As medidas foram realizadas no aparelho TA-XT2 e os valores de força, tempo e deformação geraram as curvas tensão *versus* deformação e tensão *versus* tempo das quais foram obtidos os parâmetros para os modelos matemáticos para materiais viscoelásticos: modelos de Maxwell, Maxwell Generalizado de cinco e sete elementos, e de Peleg & Normand. Foi analisada a influência dos ingredientes e da composição nos valores ajustados destes parâmetros. Os produtos das formulações sem açúcar apresentaram os maiores valores do parâmetro  $E_e$  nos modelos de Maxwell, Maxwell generalizado e nos parâmetros  $k_1$  e  $k_2$  do modelo de Peleg & Normand. Este último modelo foi o que apresentou os mais altos valores de  $R^2$  e o modelo de Maxwell, os mais baixos. No teste de preferência da análise sensorial os produtos com melhor avaliação foram os de aspecto mais rígido.

## ABSTRACT

In this work the rheological properties of the candy of banana in batter produced with different formulations containing or not sucrose, inverted sugar and citric acid were determined. The concentrations of these ingredients attended the demands of the organic certification. The ingredients were mixed in the beginning of the trial and the phase of concentration was carried out in a steam jacket tank to the atmospheric pressure up to concentration of soluble solids of 74° Brix, with exception of the formulations without sucrose in which just reached the maximum concentration of 55° Brix. Rheological tests of compression: rupture and stress relaxation were being carried out. The measurements were carried out in a TA-XT2 equipment and the values of force, time and deformation generated the curves tension versus deformation and tension versus time from which were obtained the parameters for the viscoelastic materials mathematician models: Maxwell, Generalized Maxwell models of five and seven elements, and Peleg & Normand model. It was analyzed the influence of the ingredients and from the composition in the values adjusted of these parameters. The products of the formulations without sugar presented the highest values of the parameter  $E_e$  in the models of Maxwell, Maxwell generalized and in the parameters  $k_1$  and  $k_2$  of the Peleg & Normand model. This last model presented the highest values of  $R^2$  and the Maxwell model, the shortest.

## 1. Introdução

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de banana e, especialmente no Vale do Ribeira no sul do estado de São Paulo, reconhecida como a região mais pobre do estado, encontram-se grandes áreas de produção.

Nesta região há também grande número de comunidades remanescentes de quilombos, cujo principal meio de subsistência é a produção de banana. No entanto, a existência de um grande excedente de produção leva a um volume significativo de perdas, principalmente nos meses mais quentes do ano.

Uma alternativa para reduzir as perdas e aumentar o ingresso de renda é o processamento da banana da qual pode ser obtida banana passa, doce de banana e bala de banana entre outros produtos. Adicionalmente, para acréscimo do valor de mercado desses produtos, pode ser feito o processamento com certificação orgânica.

Essa possibilidade vem ao encontro da crescente demanda para produtos sem açúcar e com certificação orgânica. Com isso é preciso desenvolver processos adequados a esta certificação que contempla ao máximo de 5% de ingredientes não certificados, de maneira que o produto atenda às características de textura desejadas. Até o momento não existe açúcar invertido com esta certificação, assim, este ingrediente será utilizado até o limite da legislação.

Entre os produtos encontrados no mercado, o doce de banana de corte apresenta uma falta de padrão de textura mesmo entre produtos de um mesmo fornecedor. Dentre os ingredientes deste produto, o ácido e o açúcar têm um papel importante na textura do produto final. O primeiro é responsável pela formação do gel e pela hidrólise da sacarose, sendo importante este último aspecto, pois a mistura de glicose e frutose resultante é mais solúvel que a

---

sacarose, reduzindo assim a cristalização e melhorando as qualidades de textura do doce.

Formulações diferentes, variando-se as concentrações de sacarose, açúcar invertido e ácido, proporcionam propriedades viscoelásticas diferentes e o conhecimento das relações entre as características de textura e condições de processo é imprescindível no desenvolvimento de produtos e processos. Neste trabalho, as formulações foram baseadas nas utilizadas nas produções tradicionais das comunidades do Vale do Ribeira, isto é, sem a adição de pectina e com uma proporção de 3:1 (banana: sacarose).

Juntamente com outros atributos sensoriais como sabor e aroma, a textura do alimento também contribui na avaliação da qualidade do alimento. Kramer (1973) definiu a textura como uma das propriedades sensoriais primárias dos alimentos que está relacionada integralmente com o sentido do tato e é potencialmente mensurável objetivamente por métodos mecânicos e expressas em unidade de massa ou força.

Dentre os instrumentos de medida de textura, destacam-se o INSTRON e o analisador de textura TA-XT2, que fornecem curvas Força *versus* Tempo, Força *versus* Deformação e Deformação *versus* Tempo das quais se obtém os parâmetros dos modelos matemáticos para materiais viscoelásticos.

Motivado pela escassez de publicações a respeito de doces de fruta em massa e suas propriedades de textura, neste trabalho será estudada a textura instrumental do doce de banana, juntamente com avaliação sensorial por teste de preferência, com objetivo de se obter os parâmetros para os modelos matemáticos para materiais viscoelásticos e sua relação com a formulação do produto, respeitados os limites da certificação orgânica.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Banana

Originária do Sudoeste da Ásia a banana é uma das frutas tropicais mais consumidas no mundo. Segundo informações na página da FAO (Food and Agriculture Organization, <http://apps1.fao.org>), a produção mundial em 2003 foi de aproximadamente 68 milhões de toneladas. O Brasil neste ano foi o segundo maior produtor com 6,5 milhões de toneladas, o que representa cerca de 9,5% da produção mundial. Os maiores produtores mundiais, além do Brasil, são Índia e Equador.

No Brasil, a cultura ocupa 500 mil hectares. São Paulo, o terceiro maior produtor (depois da Bahia e do Pará), colhe 900 mil toneladas em 45 mil hectares, empregando 20.437 pessoas. A produção está concentrada no Vale do Ribeira e Litoral Sul, destacando-se Cajati (12,7%), Miracatu (10,6%), Juquiá (9,6%), Itariri (8,4%) e Itanhaém (8,2%). A banana, responde por mais de 60% do valor da produção agrícola do Vale do Ribeira e litoral sul do estado de São Paulo, e é sua principal atividade econômica (CEASA CAMPINAS, Centrais de Abastecimentos de Campinas S. A., 2002, <http://www.ceasacampinas.com.br>).

As bananas maduras constituem excelente sobremesa devido ao seu sabor e aroma. Verdes, as bananas grandes como a banana da terra, são consumidas cozidas ou fritas. Acrescente-se a isso o fato de a banana ser consumida de maneira simples, pois a polpa (60 a 65 % de seu peso) encontra-se protegida até o momento do consumo por uma grossa casca ou pericarpo (MEDINA, 1985).

A Tabela 2.1 apresenta a composição química média em porcentagem de bananas das variedades nanica, prata, da terra e ouro (ALMEIDA, 1934 citado por BLEINROTH, 1985).

**Tabela 2.1:** Composição química de variedades de banana (ALMEIDA, 1934 citado por BLEINROTH, 1985).

Composição	Nanica	Prata	Da Terra	Ouro
Água (%)	74,12	73,79	72,06	73,81
Amido (%)	2,95	2,91	2,04	2,31
Glicose (%)	13,44	15,04	16,24	15,42
Sacarose (%)	5,72	5,54	4,70	4,13
Mat. Graxas (%)	0,90	0,13	0,24	0,34
Mat. Protéico (%)	1,31	1,43	2,56	2,26
Celulose (%)	0,32	0,21	0,64	0,39
Mat. Tânicas (%)	0,63	0,10	0,60	0,34
Cinzas (%)	0,61	0,84	0,91	2,00

Segundo MEDINA (1985), a banana é um alimento altamente energético (cerca de 100 calorias por 100 g de polpa), cujos hidratos de carbono (cerca de 22%) são facilmente assimiláveis. Embora pobre em proteínas e lipídeos, seus valores superam os da maçã, pêra, cereja e pêssego. Contém tanta vitamina C como a maçã, além de quantidades razoáveis de vitaminas A, B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub> e pequenas quantidades de D e E, e uma maior porcentagem de potássio, fósforo cálcio e ferro do que maçã e laranja.

Durante o amadurecimento da banana, uma alteração perceptível é a transformação de amido em açúcares pela ação da amilase. Esses açúcares são predominantemente redutores - glicose e frutose. Há um pequeno decréscimo da quantidade total de carboidratos devido à utilização de glicose no processo de respiração. Dentre as enzimas encontradas na banana, deve-se destacar a invertase, que transforma a sacarose em açúcares redutores. Esta enzima tem alta atividade quando a banana é desintegrada para processamento, antes de

receber tratamento térmico, o que pode acarretar alterações no produto processado (MEDINA, 1985).

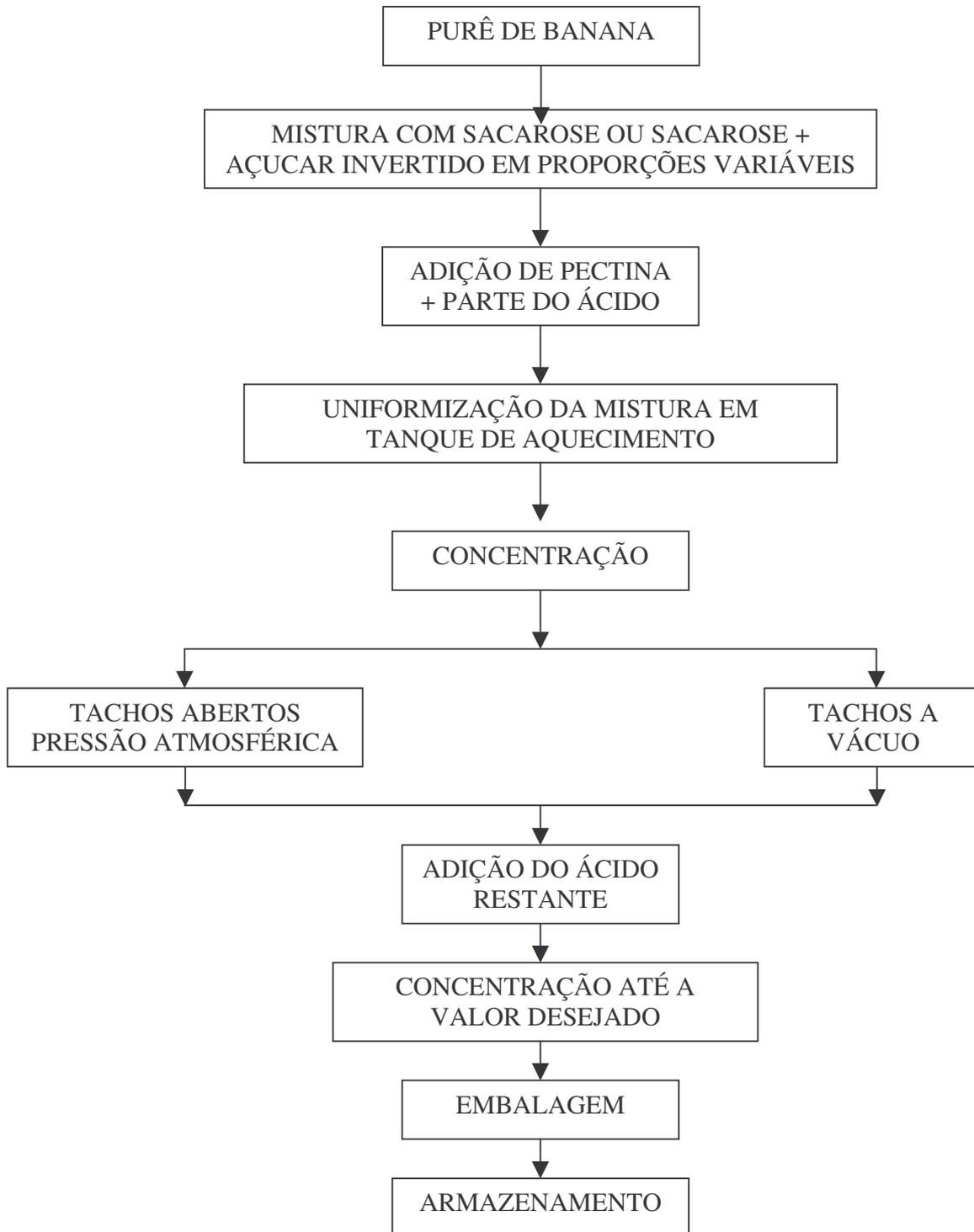
A Tabela 2.2 apresenta teores de amido, glicose e sacarose na polpa de banana Pai Antonio (ALMEIDA, 1934 citado por BLEINROTH, 1985).

**Tabela 2.2:** Teores de amido, glicose e sacarose na polpa de banana Pai Antonio, expressos em % de polpa fresca (ALMEIDA, 1934 citado por BLEINROTH, 1985).

Número de dias de maturação	Grau de maturação	Amido (%)	Glicose (%)	Sacarose (%)
0	Verde	20,00	0,09	0,61
3	Verde	17,11	0,47	0,74
6	Início de maturação	13,22	13,22	1,29
9	½ madura	8,24	13,34	1,95
12	Madura	4,54	15,58	2,64
15	Bem madura	2,22	19,04	2,63
21	Muito madura com pintas pretas	—	—	1,41

Diversos são os produtos que podem ser obtidos da banana, salientando-se dentre eles os seguintes: purê (na forma congelada, asséptico, acidificado e preservado quimicamente), néctar, fruta em calda, produtos desidratados (tais como banana liofilizada, flocos e fruta na forma de passa) e doces diversos incluindo geléias, geleiados e doce de massa (bananada) (MEDINA, 1985).

A Figura 2.1 mostra o fluxograma de produção de doce de banana (bananada) a partir de purê de banana.



**Figura 2.1:** Fluxograma do processo de doce de banana em massa ou bananada  
Fonte: MEDINA, 1985

## 2.2 Doces de Fruta

Doces de fruta são os produtos obtidos do processamento das partes comestíveis desintegradas dos vegetais com açúcares, com ou sem adição de água, pectina, ajustador de pH e outros ingredientes até a consistência apropriada, que pode ser cremosa ou uma massa que possibilite corte (JACKIX, 1982).

As frutas devem estar maduras, mas não em demasia, já que levemente verdes elas têm um maior rendimento em pectina (responsável pela formação do gel), que é convertida em ácido péctico durante o amadurecimento. Pode-se classificar as frutas quanto à riqueza em pectina e ácido. Conforme o caso, a formulação do doce pode ser complementada com estes ingredientes. A banana nanica é classificada como média em pectina e pobre em acidez (JACKIX, 1982).

A adição de acidulantes tem por finalidade o abaixamento do pH para se obter gelificação adequada e realçar o aroma natural da fruta. Entre os ácidos utilizados estão o cítrico, málico e tartárico (JACKIX, 1982).

Devido à acidez e ao aquecimento, sempre ocorre formação de açúcar invertido, isto é, a sacarose desdobra-se em glicose e frutose. Esta nova mistura é mais solúvel, de forma que se pode obter uma maior concentração de sólidos sem que ocorra cristalização. No entanto nem sempre é possível se obter a porcentagem de açúcar invertido desejada durante o processo, pois um processamento longo afetaria a pectina e o sabor da fruta. Assim, pode-se substituir parte da sacarose por açúcar invertido. Verificou-se que a substituição mínima para se evitar cristalização a 20°C varia com a porcentagem de sólidos solúveis totais conforme a Tabela 2.3 (JACKIX, 1982).

**Tabela 2.3:** Substituição mínima de sacarose para evitar cristalização. Fonte Jackix, 1982

Sólidos Solúveis (%)	Açúcar Invertido (%)
65	8
66	2
67	6
68	11
69	15
70	20
71	24
72	24

A textura final do produto depende fortemente de sua formulação, isto é, da proporção de cada um dos ingredientes citados acima, e aceitação do produto pelo consumidor é determinado em grande parte pela percepção sensorial do produto. Esta percepção da textura é determinada, num primeiro momento pelo sentido do tato e pela aparência do produto.

### 2.3 Medidas de Textura em Alimentos

A textura é um dos principais atributos relacionados à qualidade dos alimentos, sendo difícil uma definição exata, já que esta se constitui em um grupo de propriedades físicas, visuais e estruturais dos alimentos, não podendo ser analisada isoladamente (BOURNE, 1982).

SZCZESNIAK (1963) definiu textura como a manifestação sensorial e funcional das propriedades estruturais e mecânicas dos alimentos detectadas através do sentido da visão, audição e toque. As características foram divididas em: mecânicas, geométricas e outras. As mecânicas estão relacionadas à reação dos alimentos à aplicação de uma força (dureza, coesividade, viscosidade, elasticidade e adesividade); as geométricas, relacionadas com o tamanho, formato e orientação das partículas no alimento (fibroso, cristalino, granuloso, etc.) e

outras características relacionadas com a percepção da umidade, teor de óleos e gorduras nos alimentos (oleosidade, suculência, etc.).

### **2.4 Tipos de Testes**

SCOTT BLAIR (1958) classificou os métodos objetivos de textura em três tipos: fundamentais, empíricos e imitativos. Os fundamentais medem propriedades mecânicas como módulos de elasticidade ou viscosidade. Os resultados são expressos em unidades definidas, podendo-se quantificar os efeitos de variação da amostra, forma geométrica do dispositivo usado e outras condições do teste. Os métodos empíricos medem propriedades mecânicas da amostra em unidades empíricas do instrumento, aplicando uma combinação de forças como, por exemplo, compressão, tração, cisalhamento, escoamento e extrusão (BOURNE, 1982). Os métodos imitativos são os que simulam as condições em que o alimento é submetido na realidade. Os instrumentos simulam o complexo processo de mastigação, porém em grau limitado. Geralmente apresentam dispositivos em forma de dentes e/ou uma ação que imita o movimento das mandíbulas no plano vertical. O primeiro instrumento criado deste tipo foi o texturômetro da General Foods (BRENNAN,1984).

### **2.5 Tipos de Instrumentos**

Os instrumentos podem ser individuais ou múltiplos. Os individuais têm uma ação específica sobre o alimento e utilizam vários tipos de dispositivos diferentes. Os mais utilizados são: o penetrômetro em que a medida é dada através de uma força requerida para uma certa penetração ou para uma penetração total observada num determinado tempo e associada com a dureza ou firmeza do alimento; o gelômetro de Bloom, para medir o poder de gelificação; consistômetros, que são instrumentos empíricos para medir a consistência de alimentos semi-sólidos, como os amilógrafos, farinógrafos e os de cisalhamento,

utilizados para sólidos, empregando uma ou várias lâminas (SZCZESNIAK, 1963; SZCZESNIAK, 1975)

Os instrumentos múltiplos permitem obter vários parâmetros de textura em uma só medida através do registro de curvas força *versus* tempo, força *versus* deformação e deformação *versus* tempo. Estes instrumentos são usados numa grande variedade de testes de textura por apresentarem precisão e exatidão. O Instron Universal Testing Machine (UTM) é um exemplo deste tipo de instrumento, que apresenta uma grande variedade de dispositivos que podem ser adaptados, possibilitando a realização de quase todos os métodos de medidas de textura (BRENNAN, 1984). O Instron foi adaptado por BOURNE (1968) para a análise de perfil de textura (TPA) de alimentos cujo fundamento foi desenvolvido por um grupo de pesquisadores da General Foods tanto para a análise sensorial como para a instrumental a partir do “Texturômetro General Foods” que imitava o movimento de mastigação na boca (SZCZESNIAK, 1975b, a; BRANDT *et al.*, 1963; FRIEDMAN *et al.*, 1963).

Atualmente, dois instrumentos têm sido muito utilizados nas determinações da Análise de Perfil de Textura, o Instron e o Analisador de Textura TA-TX2 ; este consiste num sistema hidráulico para a movimentação de um pistão a uma velocidade variável conforme o método, ao qual é conectado um dispositivo que entra em contato com a amostra, registrando a resistência na forma de curvas das quais são obtidos os parâmetros para os modelos matemáticos de previsão de textura.

## 2.6 Reologia e Viscoelasticidade

Reologia é a ciência da deformação e fluxo de matéria. Há três maneiras de se deformar uma substância: por cisalhamento, por extensão e por compressão volumétrica. Cada alimento tem a sua curva de escoamento característica e esta informação é muito útil num grande número de aplicações industriais. Entretanto muitos fenômenos não podem ser descritos apenas em função da viscosidade e o comportamento elástico deve ser levado em consideração. Materiais com estas características são chamados materiais viscoelásticos (STEFFE, 1992).

A importância do estudo da reologia, além de estritamente tecnológica, é econômica e comercial, já que os efeitos do transporte e da manipulação na integridade física dos alimentos (tanto os que vão ser consumidos frescos ou que serão processados), seu comportamento durante o processo de fabricação e a qualidade da textura do produto acabado dependem, em grande parte, da sua resposta frente à aplicação de forças externas (COSTELL *et al* 1997).

Costell *et al* (1997) descrevem alguns modelos matemáticos para materiais viscoelásticos, os quais incorporam o elemento elástico (representado por uma mola) e o elemento viscoso (representado por um amortecedor).

Considerando-se a mola como um corpo elástico ideal, ela segue a lei de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

e o amortecedor, como um elemento fluido ideal, segue a Lei de Newton:

$$\sigma = \eta \dot{\varepsilon} \quad (2)$$

onde  $\sigma$  é a tensão,  $E$  é a constante de elasticidade,  $\varepsilon$  é a deformação do elemento elástico,  $\eta$  é a viscosidade e  $\dot{\varepsilon}$  é a taxa de deformação.

## 2.6.1 Modelos Matemáticos

### 2.6.1.1 Modelo de Maxwell

Este modelo é representado mecanicamente por uma mola e um amortecedor dispostos em série.

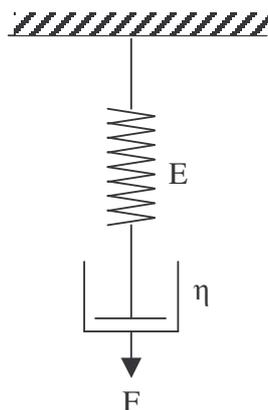
Por este modelo, segundo COSTELL *et al* (1997) a deformação total ( $\varepsilon$ ) é a soma da deformação dos dois elementos e a tensão ( $\sigma$ ) é de mesma nos dois elementos.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\eta} + \varepsilon_E \quad (3)$$

e

$$\sigma = \sigma_{\eta} = \sigma_E \quad (4)$$

onde os sub-índices  $\eta$  e  $E$  são referentes aos elementos viscoso e elástico.



**Figura 2.2:** Representação esquemática do Modelo de Maxwell

Fonte: COSTELL (1997)

Diferenciando-se a equação (3) com relação ao tempo, temos:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon} = \frac{1}{E} \left( \frac{d\sigma}{dt} \right) + \frac{\sigma}{\eta} \quad (5)$$

ou

$$\sigma + \lambda_{rel} \left( \frac{d\sigma}{dt} \right) = \eta \dot{\varepsilon} \quad (6)$$

onde

$$\lambda_{rel} = \frac{\eta}{E} \quad (7)$$

Num **teste de relaxação de tensão**, a deformação é mantida constante (Figura 2.3) e, portanto, a taxa de deformação é igual a zero ( $\dot{\varepsilon} = 0$ ) e a equação (6) se torna:

$$\sigma + \lambda_{rel} \left( \frac{d\sigma}{dt} \right) = 0 \quad (8)$$

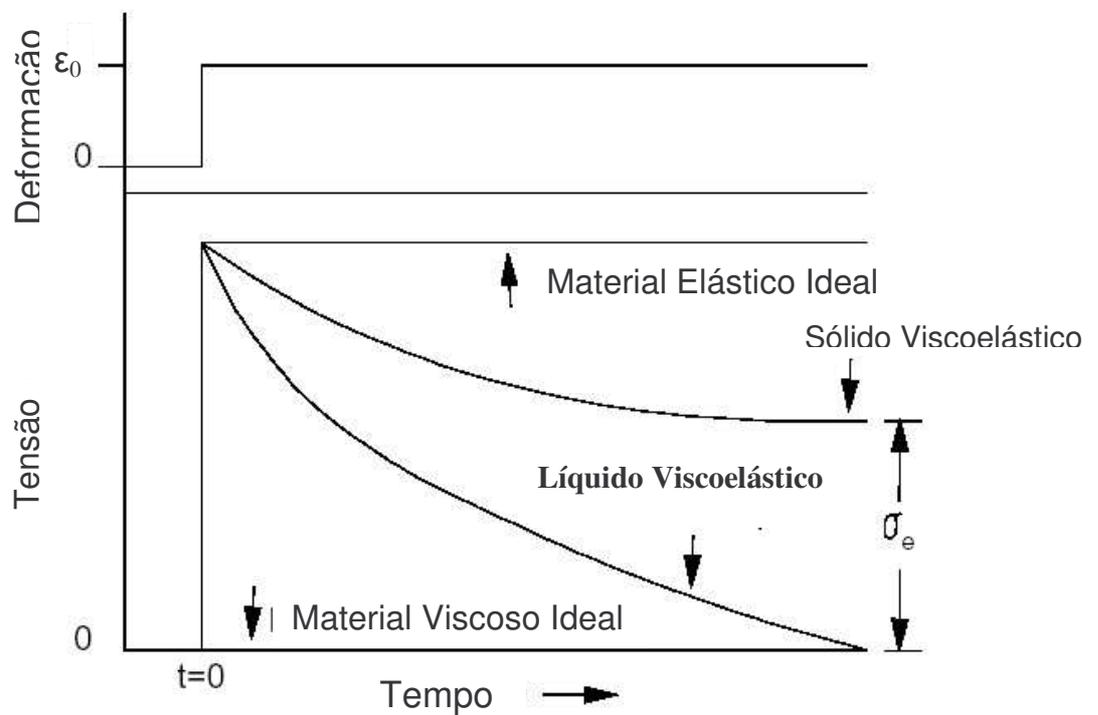
Integrando-se a equação (8) com  $\sigma = \sigma_0$  em  $t = 0$  obtém-se

$$\sigma = f(t) = \sigma_0 \exp\left(\frac{-t}{\lambda_{rel}}\right) \quad (9)$$

A equação (9) descreve o comportamento de uma curva Tensão *versus* Tempo, com deformação constante  $\varepsilon_0$  (STEFFE, 1992).

$\lambda_{rel}$  representa o tempo de relaxação que é o tempo em que a tensão inicial se reduz a uma fração de  $\sigma_0/e$ , que é equivalente a 36,8% da mesma (COSTELL *et al*, 1997).

Dados experimentais mostram que este modelo não se ajusta a vários materiais viscoelásticos pois este não inclui a tensão de equilíbrio  $\sigma_e$  (figura 2.3), que pode ser representada por uma mola em paralelo ao modelo de Maxwell. Isto pode ser visualizado na figura 2.4. Incluindo-se esta tensão de equilíbrio, a equação (9) torna-se:

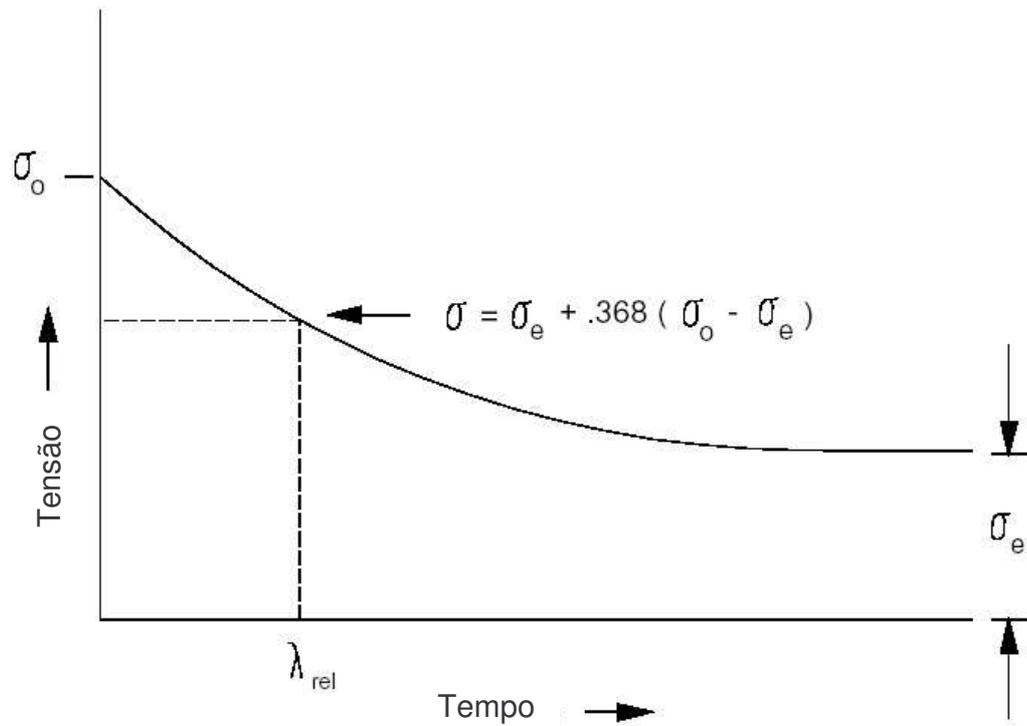


**Figura 2.3:** Curvas de relaxação de tensão. Adaptada de Steffe (1992)

$$\sigma = f(t) = \sigma_e + (\sigma_0 - \sigma_e) \exp\left(\frac{-t}{\lambda_{rel}}\right) \quad (10)$$

ou

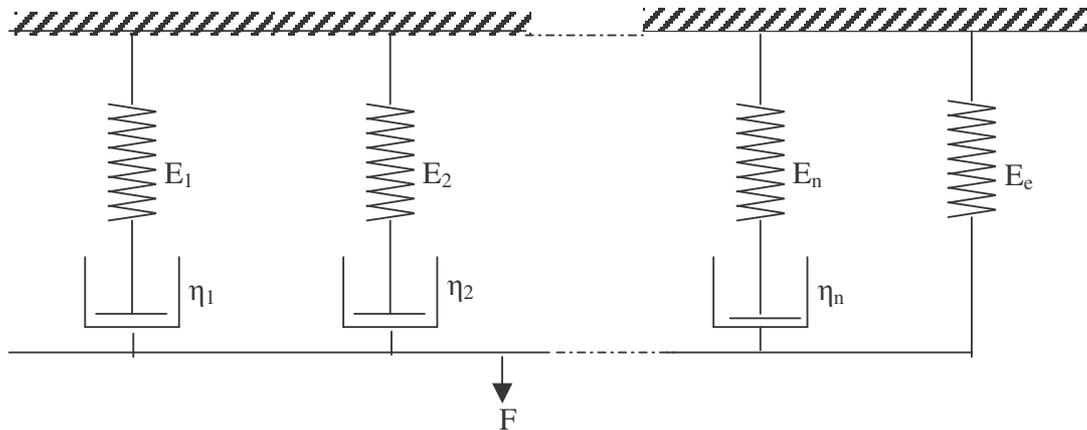
$$\sigma = f(t) = \varepsilon_0 (E_1 \exp\left(\frac{-t}{\lambda_{rel}}\right) + E_e) \quad (11)$$



**Figura 2.4:** Curva típica obtida de teste de relaxação de tensão para um modelo de Maxwell com uma mola em paralelo (equações 10 e 11). Adaptada de Steffe (1992)

### 2.6.1.2 Modelo de Maxwell Generalizado

Este modelo, representado mecanicamente por um número infinito de Modelos de Maxwell mais uma mola em paralelo, representa melhor os materiais viscoelásticos, incluindo os materiais biológicos, porque estes muitas vezes não se relaxam com uma velocidade uniforme, e sim em etapas distintas com mais de um tempo de relaxação.



**Figura 2.5:** Representação esquemática do Modelo de Maxwell Generalizado.

Fonte: COSTELL *et al* (1997)

Para uma deformação constante  $\epsilon_0$  o valor da tensão será dada por

$$\sigma = f(t) = \epsilon_0 (E_1 \exp\left(\frac{-t}{\lambda_{rel1}}\right) + E_2 \exp\left(\frac{-t}{\lambda_{rel2}}\right) + \dots + E_e) \quad (12)$$

Onde  $E_1, E_2 \dots$  são os módulos de elasticidade do corpo elástico ideal,  $E_e$  o módulo em equilíbrio;  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , são os tempos de relaxação.

### 2.6.1.3 Modelo de Peleg & Normand

PELEG & NORMAND (1983) sugerem que os dados de relaxação de tensão podem ser tratados como uma tensão normalizada e pode ser descrita pela equação linear (13) abaixo, onde o inverso de  $k_1$  representa a taxa de decaimento inicial e  $k_2$ , um hipotético valor da força assintótica normalizada que permanece sem relaxar (STEFFE, 1992):

$$\frac{\sigma_0 t}{\sigma_0 - \sigma} = k_1 + k_2 t \quad (13)$$

### 2.6.2 Teste de Ruptura

Através do **teste de compressão uniaxial** (com velocidade de compressão constante) pode-se obter parâmetros reológicos importantes do material. Na fase inicial do teste há apenas o componente elástico e a relação Tensão *versus* Deformação apresenta comportamento linear e, assim, pode ser obtido o módulo de elasticidade (E) pela inclinação da reta (COSTELL *et al* 1997).

A tensão pode ser representada como tensão aparente (*engineering stress*):

$$\sigma_e = F(t) / A_0 \quad (14)$$

ou como tensão real (*true stress*):

$$\sigma_T = F(t) / A(t) \quad (15)$$

onde  $F(t)$ ,  $A(t)$  e  $A_0$  são, respectivamente, força e área num tempo  $t$  e área inicial.

Fazendo-se a suposição que o material é incompressível, isto é, a compressão ocorre a volume constante, a equação (15) torna-se:

$$\sigma_T = F(t)H(t) / A_0H_0 \quad (16)$$

A partir da deformação linear,  $\Delta H$ , e da altura inicial da amostra,  $H_0$ , pode ser obtida a deformação aparente (*engineering strain*):

$$\varepsilon_e = \Delta H / H_0 \quad (17)$$

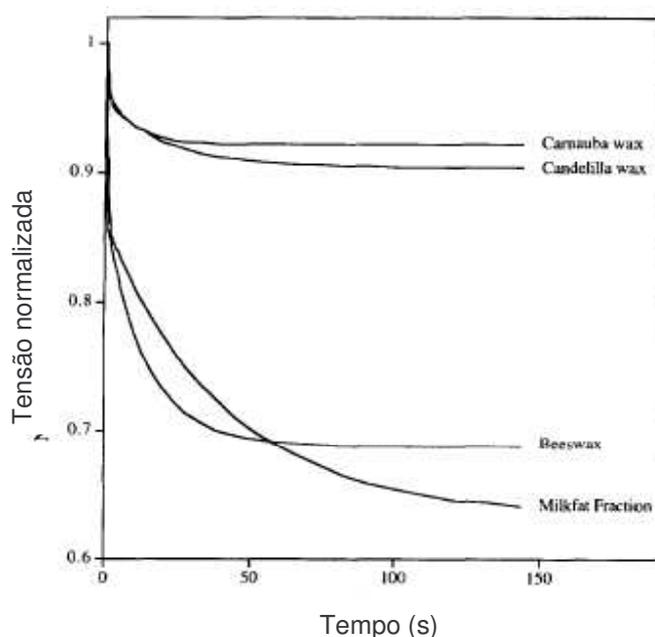
Tang *et. al.* (1998) fizeram um amplo estudo sobre a variação nos parâmetros do teste de relaxação de tensão. Eles estudaram os efeitos da deformação aplicada, da velocidade de compressão, do diâmetro da amostra e da relação diâmetro/altura, de testes consecutivos com a mesma amostra e da composição do gel. As deformações aplicadas variaram de 3 a 20% e os autores concluíram que a magnitude da tensão inicial, assim como a taxa de decaimento inicial, é proporcional à deformação aplicada e que a tensão no equilíbrio caiu levemente nas maiores deformações. Com relação à velocidade de compressão (3, 30 ou 300 mm/s), observaram que a tensão inicial também aumenta com a velocidade de compressão, no entanto, comparando-se com o efeito da deformação, o efeito da velocidade foi menos proeminente. O aumento na velocidade também aumentou a taxa de decaimento inicial sem, com isso, afetar a tensão no equilíbrio. No estudo com relação ao efeito do diâmetro e da relação diâmetro/altura, observaram que as amostras com diâmetro menor apresentaram taxa de decaimento inicial e tensão de equilíbrio maiores. Também foi observado

que a altura da amostra não afetou comportamento da relaxação e que a relação diâmetro/altura não afeta a tensão no equilíbrio. Testes consecutivos com a mesma amostra fizeram cair a tensão inicial, mas não afetou a tensão no equilíbrio. Segundo observações dos autores, o principal fator no processo de relaxação de tensão é a liberação de pressão hidráulica na matriz dos géis (água nos poros).

KAUR *et. al.* (2002) utilizaram o teste de relaxação de tensão para avaliar a textura de três variedades de batata juntamente com testes sensoriais, de cozimento e análise de perfil de textura (TPA), na qual são obtidos parâmetros como: dureza, fraturabilidade, coesividade e adesividade . Para compensar a irregularidade da superfície das amostras, foi aplicada uma pré-deformação de 0,5% nos testes de relaxação de tensão. Os parâmetros destes testes foram: velocidade de compressão de 8,33 mm/s e deformação de 10%. Foi testado o modelo de Maxwell com sete elementos. Como resultado, observaram que as variedades com melhor avaliação sensorial de palatibilidade também apresentaram os valores mais elevados das constantes elásticas do Modelo de Maxwell Generalizado, além de, na análise de perfil de textura, estas variedades apresentarem maiores valores em dureza, fraturabilidade, coesividade, adesividade que as variedades com menor avaliação em palatibilidade.

SHELLHAMMER *et. al.* (1997) compararam as propriedades viscoelásticas das ceras de abelha, de carnaúba, de *candelilla* e de uma fração da gordura do leite. Os resultados foram ajustados ao modelo de Maxwell generalizado de cinco elementos (uma mola e dois elementos de Maxwell ligados em paralelo). Como parâmetro dos testes foram utilizados: deformação de 2%, velocidade de compressão de 1mm/s e os dados foram registrados por 140 s a uma taxa de 200 pontos por segundo. As ceras de carnaúba e *candelilla* apresentaram comportamentos relativamente semelhantes, com valores das constantes elásticas no equilíbrio  $E_e$  mais elevados que as outras ceras, indicando produtos mais rígidos. Dentre estas duas ceras, a de carnaúba apresentou uma

relaxação de tensão mais rápida logo após a carga. Devido às grandes diferenças entre os valores de tensão máxima atingida nas quatro amostras, as tensões foram normalizadas, dividindo-se o valor instantâneo pela máxima tensão atingida, facilitando assim a comparação entre elas (figura 2.7). Pode-se observar por este gráfico que as ceras se dividiram em dois grupos. Num primeiro, as ceras de carnaúba e *candelilla* relaxaram menos que 10% da tensão inicial durante todo o período do teste mostrando-se muito mais rígidas, enquanto que, no outro grupo, a cera de abelha e a gordura de leite relaxaram uma fração maior da tensão inicial. Observa-se também a diferença entre os tempos de relaxação, com a cera de carnaúba apresentando o menor e a gordura de leite o maior tempo de relaxação.



**Figura 2.6:** Curvas de relaxação de tensão normalizadas (Fonte: SHELLHAMMER *et. al.*, 1997)

Num estudo sobre o comportamento reológico de sementes de trigo e canola, BARGALE *et. al.*(1995) concluíram que o módulo de elasticidade e a máxima tensão de contato foram fortemente influenciados pela umidade das sementes, sendo que estes valores variaram inversamente com o teor de umidade. Um modelo de Maxwell com três termos de decaimento exponencial foi

o que melhor descreveu o processo de relaxação de tensão. O termo de tensão no equilíbrio foi desconsiderado porque em testes com até dez horas esta tensão se reduziu a zero. Foram testados diferentes níveis de deformação com taxa de deformação de 0,2 mm/s e os autores chegaram a conclusão de que a força na relaxação aumenta com o aumento do nível de deformação. Segundo estes autores, o conhecimento da força de relaxação como função do teor de umidade, taxa de deformação e nível de deformação pode ser útil no *design* de processos para otimizar seus parâmetros assim como no desenvolvimento de novos produtos. Estas variáveis podem ser manipuladas desde o ponto de vista de conservação de energia até o de controle de qualidade.

LEWICKI & SPIESS (1994) obtiveram os parâmetros para a equação normalizada de Peleg & Pollak (1982), semelhante à equação (13), para uvas-passas através de teste de relaxação até que a força inicial se reduzisse à metade do valor inicial. Os parâmetros da equação mostraram-se dependentes da tensão máxima desenvolvida. A inclinação da curva normalizada de relaxação ( $k_2$ ) aumentou com o aumento da tensão máxima alcançada e aproximou-se da assíntota. Para valores de tensão máxima acima de 0,3 MPa este parâmetro mostrou-se independente da tensão desenvolvida. O parâmetro  $k_1$  mostrou-se constante até 0,3 MPa e então aumentou com a tensão.

LIMA & SINGH (2001) estudaram a curva de relaxação de tensão, para uma deformação constante de 10%, para batata reestruturada com temperatura e tempo de fritura em três níveis diferentes, obtendo um modelo de Maxwell de dois elementos mais uma mola em paralelo. Os valores das constantes elásticas aumentaram significativamente com os aumentos do tempo e temperatura de fritura. Com tempos e temperaturas maiores, o produto final ficou com teores de umidade mais baixo, o que contribuiu para o aumento nos valores destas constantes.

Através de testes de relaxação de tensão, BUDIMAN *et al* (2000) obtiveram os parâmetros para um modelo de Maxwell de dois elementos com uma mola em paralelo para queijo análogo com diferentes fontes de gordura e teores de umidade. Foram utilizadas velocidades de compressão de 10 e 40 mm/min. A tensão inicial e de equilíbrio foram maiores quando se utilizou gordura de leite quando comparados com os queijos com gordura vegetal. Com as duas fontes de gordura estes valores diminuíram com o teor de umidade. Os valores das constantes elásticas diminuíram com o aumento da umidade e foram maiores para a gordura de leite. Concluíram, também, que o primeiro tempo de relaxação ( $\lambda_1$ ) está relacionado com o comportamento do líquido, enquanto  $\lambda_2$  está associado ao comportamento do sólido. Os valores de tensão inicial foram significativamente maiores quando se utilizou velocidade de compressão de 40 mm/min, enquanto que os valores de tensão de equilíbrio tiveram uma variação menor. A variação na tensão inicial pode ser explicada considerando-se que ocorre relaxação durante a deformação e, quando uma velocidade maior é aplicada, há menos tempo para a relaxação.

Gabas (2002) obteve os parâmetros para os modelos de Maxwell, Maxwell Generalizado e de Peleg & Normand para ameixas reidratadas para diferentes temperaturas de secagem e teores de umidade. O modelo de Maxwell Generalizado apresentou melhores valores de médias quadráticas e coeficientes de determinação que os outros dois modelos. Foi observado que os módulos de elasticidade e viscosidade diminuíram com os aumentos da atividade de água e de temperatura, sendo que o componente elástico foi menos afetado que o componente viscoso. Isto mostra que os tempos de relaxação são afetados principalmente pelo elemento viscoso e pode indicar que os componentes estruturais das amostras, como as paredes celulares, associados ao componente elástico, são menos afetados pelo teor de água do que aqueles relacionados com o comportamento viscoso, como as soluções contidas nas células. Materiais que apresentam uma predominância no comportamento viscoso, em detrimento de seu

comportamento elástico, tem menores tempos de relaxação, isto é, dissipam mais rapidamente a tensão aplicada.

Cunha (2002) estudou as propriedades reológicas de queijo Minas Frescal após 5, 8, 12 e 16 dias da fabricação, para três níveis de fator de concentração de retentado (FC) através dos testes de relaxação, *creep* e compressão uniaxial. Do teste de relaxação foram obtidos os parâmetros para o modelo de Maxwell generalizado com cinco elementos e para o modelo de Peleg. Do teste de *creep* foram obtidos os parâmetros para o modelo de Kelvin. Do teste de compressão uniaxial foram obtidos os valores de tensão de ruptura, deformação de ruptura, módulo de elasticidade, tensão máxima e trabalho de ruptura. Não foram observadas alterações significativas nos módulos de elasticidade com o tempo de armazenamento. Foram observadas alterações apenas com relação ao FC, isto é, devido ao tipo de rede formada pela matriz protéica na coagulação dos retentados. O mesmo comportamento foi observado com relação ao componente viscoso. Pelo modelo normalizado de Peleg não foi possível detectar diferenças entre os queijos, pois os parâmetros desta equação levam em conta apenas o tempo de relaxação, que é uma relação entre a elasticidade e a viscosidade do material. O modelo de Maxwell Generalizado mostrou-se mais adequado para este tipo de avaliação. Pelo teste de compressão uniaxial, os resultados obtidos foram semelhantes ao do teste de relaxação, isto é, os valores de tensão de ruptura, deformação de ruptura, módulo de elasticidade, tensão máxima e trabalho de ruptura aumentaram com o fator de concentração, mas não com o tempo de armazenamento.

Limanond *et al* (2002) realizaram testes de relaxação em *tortillas* de milho com diferentes temperaturas, umidades relativas e tempos de estocagem. Devido à rigidez do material eles realizaram o teste com 3% de deformação e obtiveram os parâmetros para modelos de Maxwell com sete elementos. Foram observadas diferenças significativas com relação à rigidez do material que diminuiu com o aumento da temperatura de estocagem e aumentou com o tempo.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Matéria-Prima

##### 3.1.1. Polpa de banana

Adquirida de N & N Polpas e Frutas Ltda. do tipo 60E CFCS (com fibras e com semente) adicionadas de conservante benzoato de sódio. A polpa veio acondicionada em bolsas plásticas de aproximadamente 15 kg. Adquirido em dois lotes com as características listadas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1.** Características físico-químicas da polpa de banana utilizada nos processamentos

	Lote 1	Lote 2
<b>Sólidos Solúveis(º Brix)</b>	22 – 28	22 – 28
<b>pH:</b>	4,2 – 4,8	4,5 – 4,9
<b>Cor</b>	Marrom avermelhado	Marrom avermelhado
<b>Acidez</b>	0,4 – 0,6(ácido cítrico)	0,4 – 0,6 (ácido cítrico)
<b>Sabor</b>	Característico de banana madura	Característico de banana madura

Fonte: Laudos de análises do lotes fornecidos pelo fabricante.

### **3.1.2. Sacarose**

O Açúcar Cristal da Barra produzido por Usina da Barra S. A. Açúcar e Álcool foi adquirido no mercado local.

### **3.1.3 Açúcar Invertido**

O açúcar invertido utilizado era da Marca Gludex 216 (Dulcini S. A). O produto veio acondicionado em bolsas plásticas de 5 kg. Com composição de: 6% de sacarose, 32% de frutose, 32% dextrose e 30% de água.

### **3.1.4. Ácido Cítrico**

*Ácido Cítrico monohidratado P. A. (Nuclear) adquirido da distribuidora Alkimia Com. Mat. Para Laboratórios Ltda.*

## **3.2. PROCESSAMENTO**

Os processamentos foram realizados na planta piloto do Departamento de Tecnologia de Alimentos da FEA-UNICAMP. Foram realizados em tacho encamisado aberto fabricado por ICMA (Industria e Comércio de Máquinas Agrícolas Ltda. Com capacidade de 200 litros), com todos ingredientes sendo adicionados no início dos processamentos. Foi estabelecido o ponto final do produto a concentração de sólidos solúveis igual a 74º Brix, com exceção dos processamentos sem açúcar nos quais só foi possível obter concentrações finais médias de 56º Brix, pois a partir desta concentração o produto passou a grudar nas paredes do tacho.

Para a medição da porcentagem de sólidos solúveis foi utilizado um refratômetro *Carl Zeiss Jena* (Alemanha) modelo 32-G110d.

A Tabela 3.2 mostra as formulações dos processamentos.

**Tabela 3.2:** Formulações utilizadas nos processamentos

<b>Processamento</b>	<b>Ingrediente</b>	<b>%</b>
<b>1</b>	Polpa de banana	100
<b>2</b>	Polpa de banana	75
	Sacarose	25
<b>3</b>	Polpa de banana	75
	Sacarose	23,75
	Xarope de açúcar invertido	1,25
<b>4</b>	Polpa de banana	100
	Ácido Cítrico	0,5 (adicional)
<b>5</b>	Polpa de banana	75
	Sacarose	25
	Ácido Cítrico	0,5 (adicional)
<b>6</b>	Polpa de banana	75
	Sacarose	23,75
	Xarope de açúcar invertido	1,25
	Ácido Cítrico	0,5 (adicional)

### **3.3. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS**

#### **3.3.1. Textura**

As análises de textura foram realizadas num Texturômetro TA-XT2i (Stable Microsystems, Inglaterra) no Laboratório de Engenharia de Processos (LEP) do Departamento de Engenharia de Alimentos (DEA) na Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA) da UNICAMP.

##### **3.3.1.1. Teste de Relaxação de Tensão**

Para o Teste de Relaxação de Tensão utilizou-se uma geometria cilíndrica de 3 cm de diâmetro.

As amostras foram cortadas em forma de paralelepípedo com 7,5 cm de comprimento, 5 cm de largura e 4 cm de altura. Estas foram comprimidas até 5% de deformação com uma velocidade de 7 mm/s e esta deformação foi mantida constante por 10 minutos. Durante esse tempo foi registrada a relaxação da tensão numa taxa de 4 medidas por segundo. A geometria foi lubrificada com o objetivo de se eliminar a influência do atrito, entre a amostra e o equipamento, nos resultados obtidos. Foram realizadas dez medidas para cada processamento.

As amostras foram armazenadas à temperatura ambiente e os testes foram realizados cinco dias após o processamento também à temperatura ambiente.

Os dados foram analisados utilizando-se a ferramenta *Nonlinear Estimation* de programa *Statistica* (StatSoft Inc.)

##### **3.3.1.2. Teste de Ruptura por Compressão**

Neste teste foram utilizadas as mesmas amostras do Teste de Relaxação de Tensão. As amostras foram comprimidas com velocidade constante de 1 mm/s até 80% de deformação. Durante esse teste foi registrada a força na compressão numa taxa de 50 medidas por segundo. Neste teste foi utilizada uma

geometria em formato de dente incisivo. Foram realizadas dez medidas para cada processamento.

#### **3.3.2. Análises Físico-Químicas**

##### **3.3.2.1. Açúcares Redutores e Sacarose**

A análise de teor de Açúcares Redutores e Sacarose foi realizada no Laboratório de Análise de Alimentos (LAA) do Departamento de Ciência de Alimentos (DCA) da FEA-Unicamp.

Primeiramente, foi feita a extração dos açúcares das amostras. Para os processamentos com açúcar, foram pesadas amostras com 4 g e, para os sem açúcar, 8 g. As extrações foram feitas em duas etapas, a primeira com 100 ml de etanol 80% (v/v) e a segunda com 50 ml para as amostras com açúcar e, 80 ml e 40 ml para as amostras sem açúcar, conforme fluxograma apresentado na figura 3.1.

A determinação de açúcares redutores e totais, realizada em duplicata, foi feita pelo método de Lane & Eynon (A. O. A. C. método 31.034-6).

##### **3.3.2.2. Umidade**

A análise de teor de umidade foi realizada em triplicada no Laboratório de Análise de Alimentos do Departamento de Ciência de Alimentos da FEA-Unicamp. Nesta análise, pelo método gravimétrico, a secagem das amostras foi feita utilizando-se recipientes metálicos com areia em estufa a vácuo Tecnal Modelo TE-395 a 60° C por 48 horas.

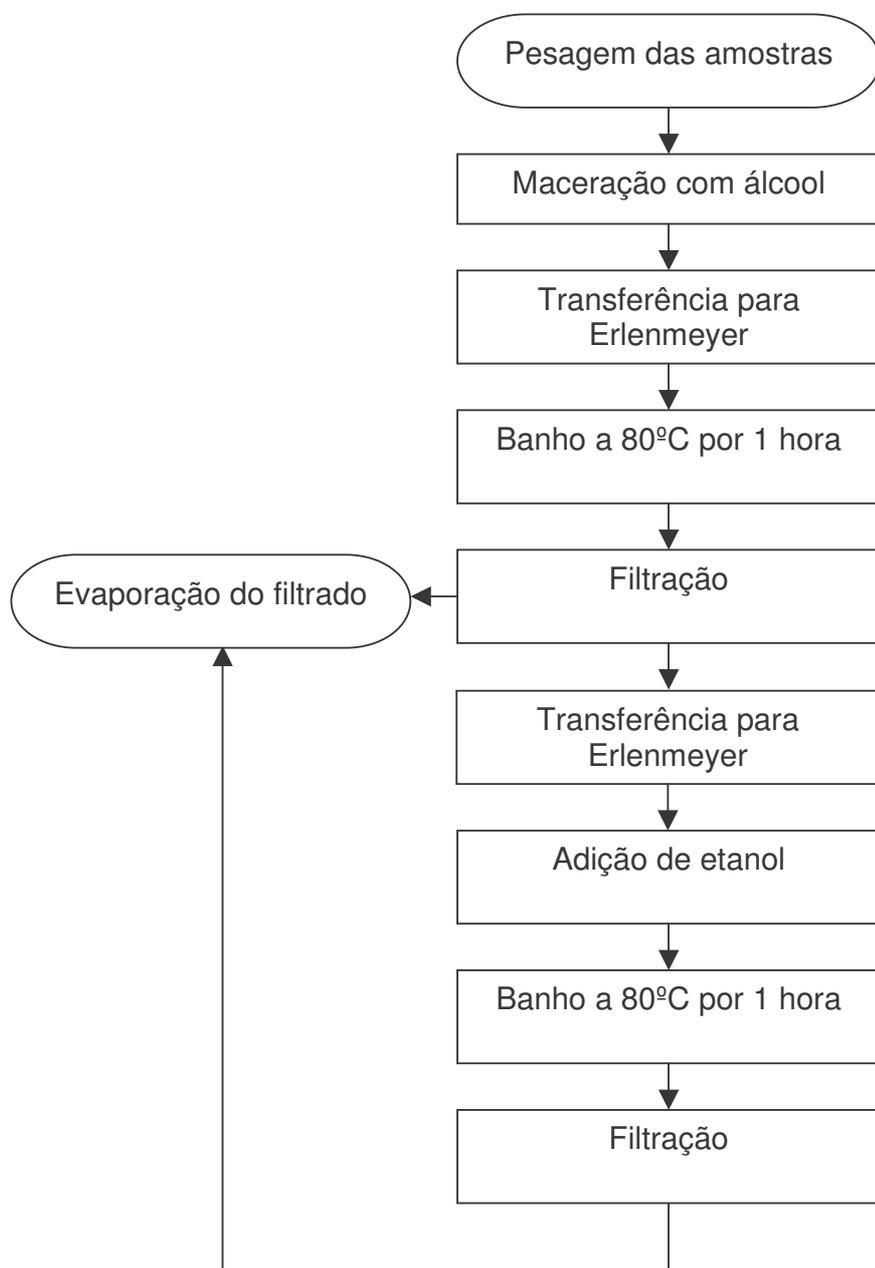
##### **3.3.2.3. Atividade de Água**

A análise de atividade de água foi realizada no Laboratório de Engenharia de Processos do Departamento de Engenharia de Alimentos da FEA-UNICAMP.

Para esta análise foi utilizado o equipamento Medidor de Atividade de Água fabricado por Aqualab Modelo CX-2T. As análises foram feitas em triplicata.

#### **3.4. Análise Sensorial**

A análise sensorial foi realizada no Laboratório de Análise Sensorial do Departamento de Alimentos e Nutrição (DEPAN). Foram avaliados os atributos: textura tátil, textura visual, aroma, textura oral, sabor por 30 provadores não treinados. Para avaliação da textura tátil foram utilizados blocos completos casualizados e, para os demais atributos, blocos completos casualizados de forma monádica. Cópias dos formulários de avaliação encontram-se nos apêndices.



**Figura 3.1** Fluxograma de extração de açúcares para análise de teor de açúcares redutores e sacarose

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

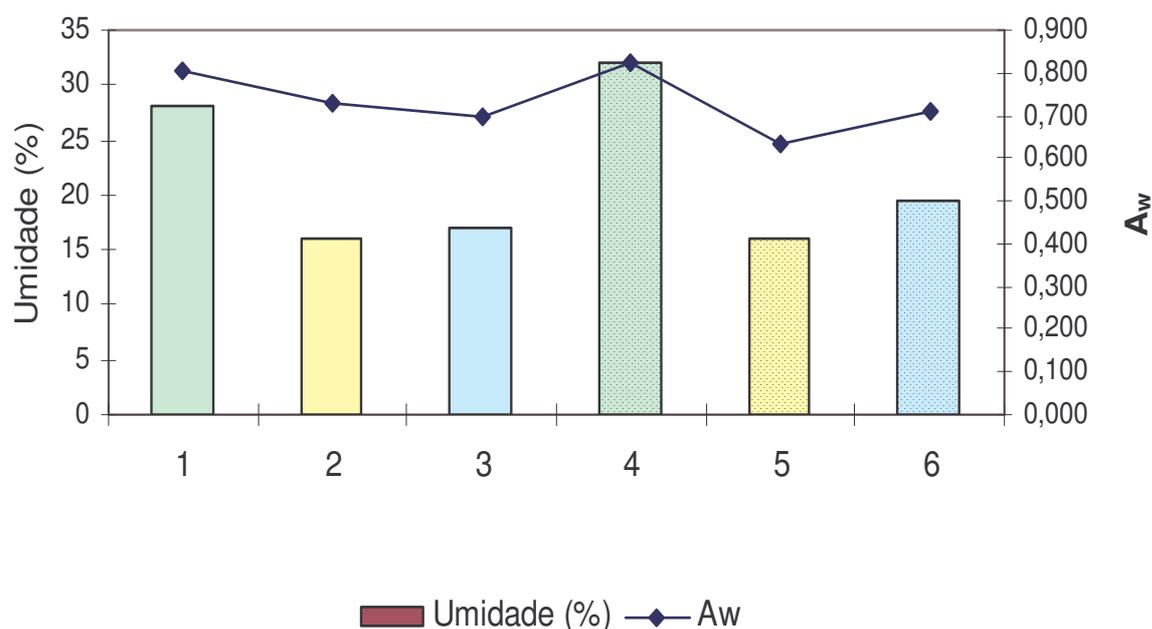
### 4.1. COMPOSIÇÃO DOS PRODUTOS

Os resultados das análises de teor de umidade e de atividade de água estão na Tabela 4.1 e os das análises de teor de açúcares redutores e sacarose, ambos em base seca, estão na Tabela 4.2.

Os valores de teor de umidade mais elevados nos processamentos 1 e 4, ambos sem açúcar em sua formulação, ocorreram devido ao fato de não ter sido possível conduzir estes processamentos até a concentração de sólidos solúveis de 74° Brix. Com concentrações de 53° Brix para o processamento 1 (polpa de banana) e, com 55° Brix para o processamento 4 (polpa de banana e ácido cítrico), o produto começou a grudar na parede do tacho e os processamentos tiveram que ser interrompidos devido a limitações do equipamento. Pela Figura 4.1, é possível observar que os valores de umidade e atividade de água seguem a mesma tendência.

**Tabela 4.1:** Teores de umidade e atividade de água. Processamentos 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido

Processamento	Umidade (%)	Atividade de água ( $A_w$ )
1	27,70 ± 0,45	0,802 ± 0,011
2	16,25 ± 2,05	0,727 ± 0,011
3	13,66 ± 1,00	0,655 ± 0,015
4	31,90 ± 1,36	0,824 ± 0,002
5	16,15 ± 1,98	0,659 ± 0,009
6	19,62 ± 0,79	0,711 ± 0,007

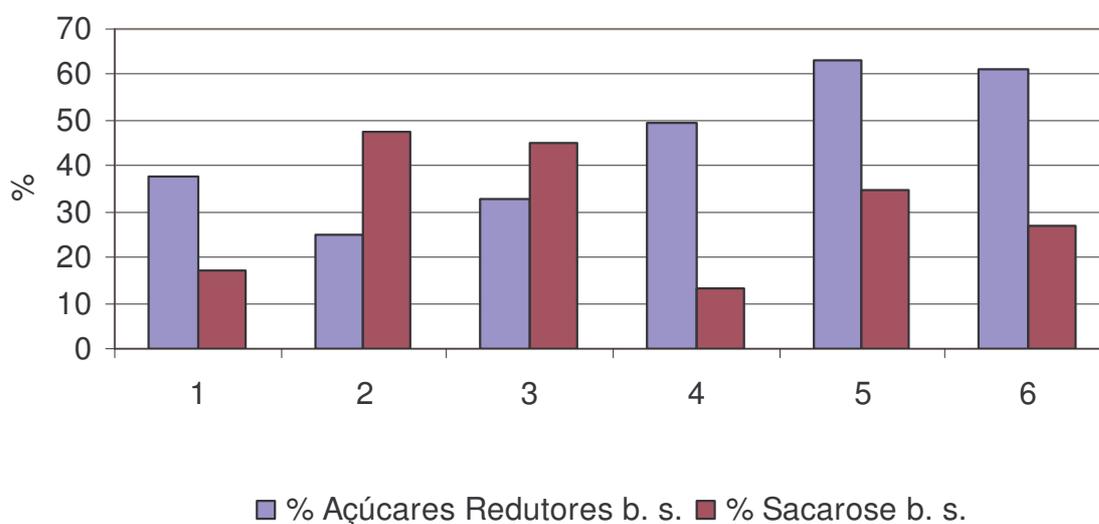


**Figura 4.1:** Teores médios de umidade e atividade de água. Processamentos 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido

Os teores de açúcares redutores e de sacarose, apresentados na Tabela 4.2 e Figura 4.2, mostram, quando comparados os processamentos que diferem pela presença de ácido cítrico na sua formulação, que houve um aumento na concentração de açúcares redutores e uma redução na concentração de sacarose. Este efeito é provocado pela ação do ácido e do aquecimento sobre a sacarose. Pode-se observar que este efeito foi mais pronunciado nos processamentos 2 e 5 nos quais houve um aumento de 46%.

**Tabela 4.2:** Teores de açúcares redutores e sacarose, ambos em base seca. Processamentos 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido

Processamento	Açúcares redutores (%)	Sacarose (%)
1	37,92 ± 4,44	17,29 ± 2,64
2	24,75 ± 0,94	47,53 ± 1,61
3	32,99 ± 1,28	44,93 ± 3,12
4	49,63 ± 2,02	13,08 ± 3,13
5	63,10 ± 2,89	34,76 ± 7,82
6	61,37 ± 6,72	26,89 ± 3,80

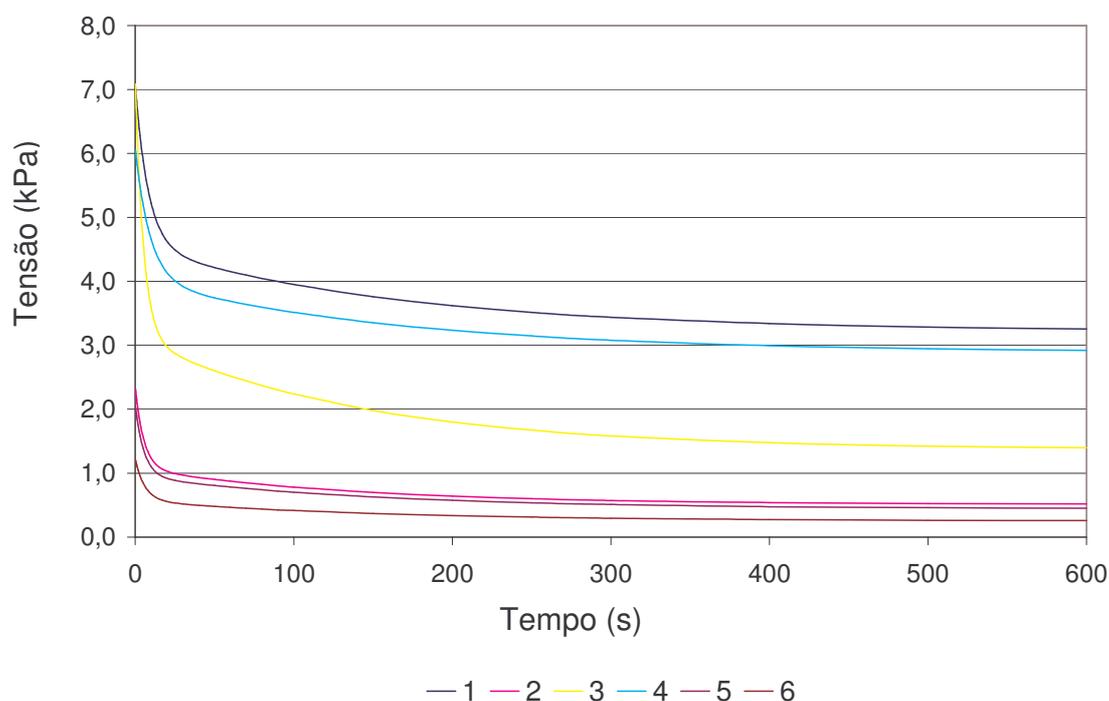


**Figura 4.2:** Teor médio de açúcares redutores e sacarose em base seca. Processamentos 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.

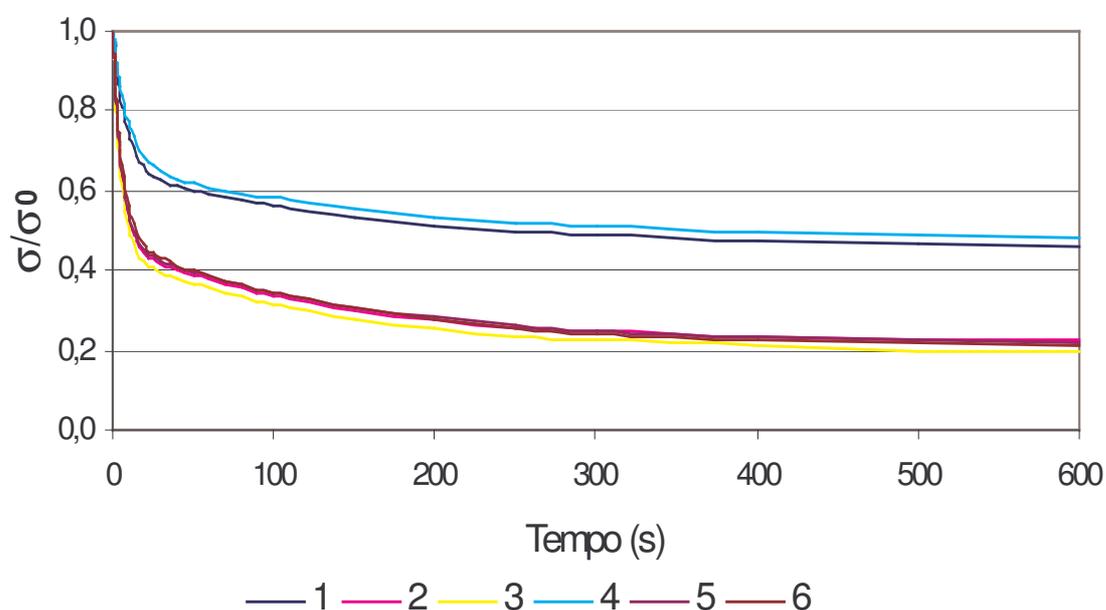
## 4.2. COMPORTAMENTO REOLÓGICO

### 4.2.1. TESTE DE RELAXAÇÃO DE TENSÃO

Na Figura 4.3 são mostradas as curvas de relaxação de tensão obtidas pelos valores médios dos parâmetros para o modelo de Maxwell generalizado de cinco elementos (Tabela 4.4). Nesta figura pode ser observada uma clara diferença entre os processamentos sem sacarose (1 e 4) e os demais. Na Figura 4.4 podem ser observadas as curvas de relaxação de tensão com seus valores normalizados, isto é, com os valores de tensão divididos pelo valor máximo de tensão alcançado.



**Figura 4.3:** Curvas de relaxação de tensão dos produtos. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



**Figura 4.4:** Curvas de relaxação de tensão normalizadas dos produtos. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.

#### 4.2.1.1. MODELOS DE MAXWELL

Os Modelos de Maxwell são aplicáveis para deformações que se encontram dentro do intervalo de viscoelasticidade linear, isto é, quando a relação entre a tensão aplicada e a deformação é somente função do tempo (COSTELL *et al*, 1997). Neste trabalho, foi observado o comportamento linear até uma deformação de 5%, valor este utilizado nos ensaios de relaxação de tensão.

As Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam os valores dos parâmetros dos modelos de Maxwell e modelos de Maxwell generalizado com dois e três elementos mais uma mola e dos valores de  $R^2$ . Os parâmetros de viscosidade ( $\eta_n$ ) foram calculados a partir da equação 7.

**Tabela 4.3:** Parâmetros para o modelo de Maxwell. Processamentos 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.

Processamento	1	2	3	4	5	6
$E_e$ (kPa)	5,53	0,55	1,56	2,99	0,48	0,28
$E_1$ (kPa)	3,11	0,88	2,73	1,79	0,77	0,49
$\lambda_1$ (s)	74,99	63,54	67,43	73,23	71,28	71,43
$\eta_1$ (kPa.s)	230,96	56,04	184,51	131,32	55,11	34,79
$R^2$	0,85	0,85	0,83	0,83	0,83	0,84

**Tabela 4.4:** Parâmetros para o modelo de Maxwell de 2 elementos mais uma mola. Processamentos 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.

Processamento	1	2	3	4	5	6
$E_e$ (kPa)	3,22	0,51	1,37	2,89	0,44	0,25
$E_1$ (kPa)	2,51	1,27	4,05	2,05	1,10	0,64
$\eta_1$ (kPa.s)	20,69	6,90	21,10	19,13	6,13	3,93
$\lambda_1$ (s)	8,25	5,45	5,21	9,34	5,55	6,10
$E_2$ (kPa)	1,34	0,56	1,75	1,14	0,51	0,32
$\eta_2$ (kPa.s)	220,54	77,00	249,63	190,52	75,16	47,00
$\lambda_2$ (s)	164,99	136,34	142,64	167,67	146,68	147,49
$R^2$	0,94	0,95	0,94	0,92	0,95	0,94

Para análise dos resultados dos testes reológicos juntamente com dados de formulação e análises de composição, foram utilizados os valores obtidos para o Modelo de Maxwell Generalizado de dois elementos mais uma mola. Este modelo foi escolhido porque apresentou um ajuste melhor que o

Modelo de Maxwell e não houve uma melhora considerável quando se testou o Modelo de Maxwell Generalizado de três elementos mais uma mola.

**Tabela 4.5:** Parâmetros para o modelo de Maxwell de 3 elementos mais uma mola. Processamentos 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.

Processamento	1	2	3	4	5	6
$E_e(\text{kPa})$	3,13	0,46	1,21	2,74	0,38	0,23
$E_1(\text{kPa})$	1,97	1,12	3,70	1,75	0,99	0,54
$\eta_1(\text{kPa.s})$	20,85	2,70	10,48	10,51	2,98	4,65
$\lambda_1(\text{s})$	10,48	2,40	2,94	6,01	2,99	9,31
$E_2(\text{kPa})$	1,14	0,50	1,47	0,86	0,41	0,33
$\eta_2(\text{kPa.s})$	114,23	13,11	40,03	140,84	11,78	7,86
$\lambda_2(\text{s})$	90,42	26,01	27,99	159,01	28,53	24,44
$E_3(\text{kPa})$	1,32	0,43	1,35	0,86	0,40	0,25
$\lambda_3(\text{s})$	236,36	232,40	254,58	203,54	258,61	264,93
$\eta_3(\text{kPa.s})$	273,08	100,48	340,33	171,34	103,45	67,55
$R^2$	0,95	0,97	0,95	0,92	0,96	0,95

#### 4.2.1.1.1. EFEITO DA SACAROSE

Pode-se observar o efeito da presença da sacarose na formulação nos parâmetros dos modelos matemáticos comparando-se os resultados para os processamentos 1 com 2, e 4 com 5. Pela Figura 4.5 pode-se observar que nos dois casos a presença de sacarose na formulação levou a uma redução no valor dos parâmetros de elasticidade ( $E_e$ ,  $E_1$  e  $E_2$ ). Isto mostra o efeito plasticizante da sacarose, isto é, o produto torna-se menos elástico e mais plástico.

O parâmetro que se mostrou mais afetado pela presença de sacarose na formulação foi o tempo de relaxação ( $\lambda$ ), independentemente da substituição de parte da sacarose por açúcar invertido (Tabela 4.4 e Figura 4.8).

Também se observa que nos processamentos 1 e 4 o parâmetro  $E_e$ , que representa a fração da tensão inicial que não se relaxa, é a de maior valor e, nos processamentos 2 e 5, o predomínio é dos parâmetros  $E_1$  e  $E_2$  que fazem parte dos termos de decaimento exponencial, isto é, a fração da tensão inicial que relaxa com o tempo. Isto explica o diferente comportamento das curvas na figura 4.4.

Com relação aos resultados obtidos pela análise de teor de sacarose, esta tendência inversa entre o valor da constante elástica e a concentração de sacarose não aparece tão claramente. Pode-se dizer que ela aparece somente no parâmetro  $E_e$  entre os processamentos sem adição de ácido cítrico. Os parâmetros  $E_1$ ,  $\eta_1$  e  $\lambda_1$  aparentemente não são afetados pela concentração de sacarose.

Os resultados das análises do teor de açúcares redutores não mostram relação com os parâmetros do modelo de Maxwell generalizado.

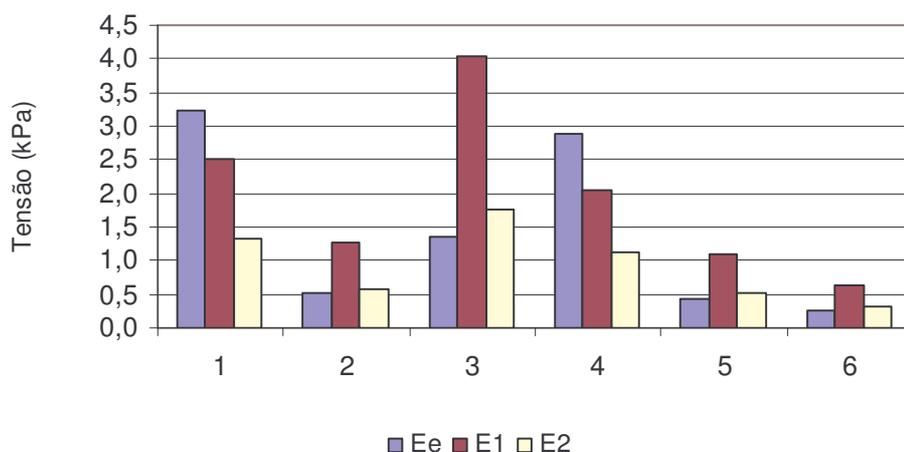
### 4.2.1.1.2. EFEITO DO AÇÚCAR INVERTIDO

O efeito da presença de açúcar invertido na formulação pode ser observado comparando-se os resultados dos processamentos 2 com 3 e 5 com 6. Neste caso, verifica-se na Figura 4.5 comportamentos diferentes nas duas comparações. Nos processamentos sem a adição de ácido cítrico (2 e 3), a presença de açúcar invertido na formulação levou a um aumento nos valores das constantes elásticas. Já nos processamentos com a adição de ácido (5 e 6) houve uma ligeira redução.

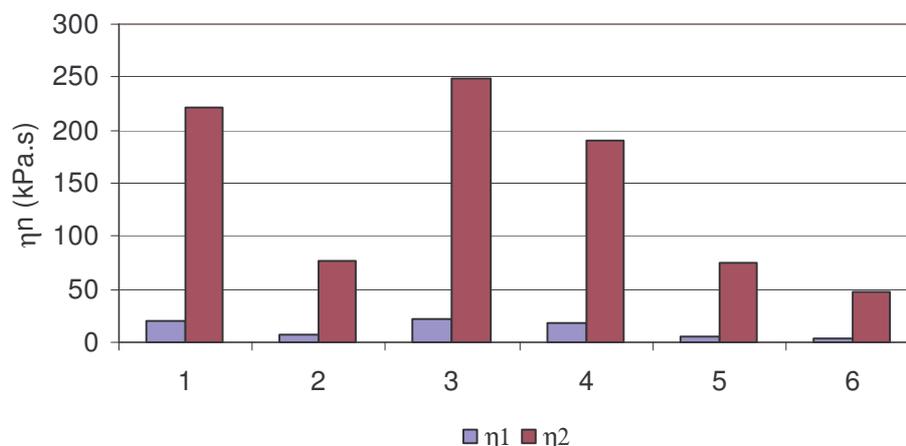
Em ambos os casos prevaleceram os parâmetros dos termos de decaimento exponencial. Este comportamento também foi observado nas constantes de viscosidade (Figura 4.6).

#### 4.2.1.1.3. EFEITO DO ÁCIDO CÍTRICO

Aqui serão comparados os processamentos 1 com 4, 2 com 5 e 3 com 6. O efeito mais marcante foi observado nos processamentos com adição de açúcar invertido (3 e 6), nos quais houve uma grande redução nos valores das constantes de elasticidade e viscosidade (Figuras 4.5 e 4.6) causado pela adição de ácido. Este efeito não era o esperado, pois a adição de ácido levaria à inversão da sacarose que reduz a característica elástica dos produtos. Por outro lado, há também o efeito do ácido sobre o amido. Segundo Wang *et. al.* (2002), géis de amido tratados com ácido tiveram suas características viscoelásticas afetadas: houve redução nos parâmetros de elasticidade e viscosidade quando estudaram viscoelasticidade dinâmica destes géis. Nos outros casos as variações nestes valores foram muito pequenas.



**Figura 4.5:** Módulos de elasticidade dos produtos. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



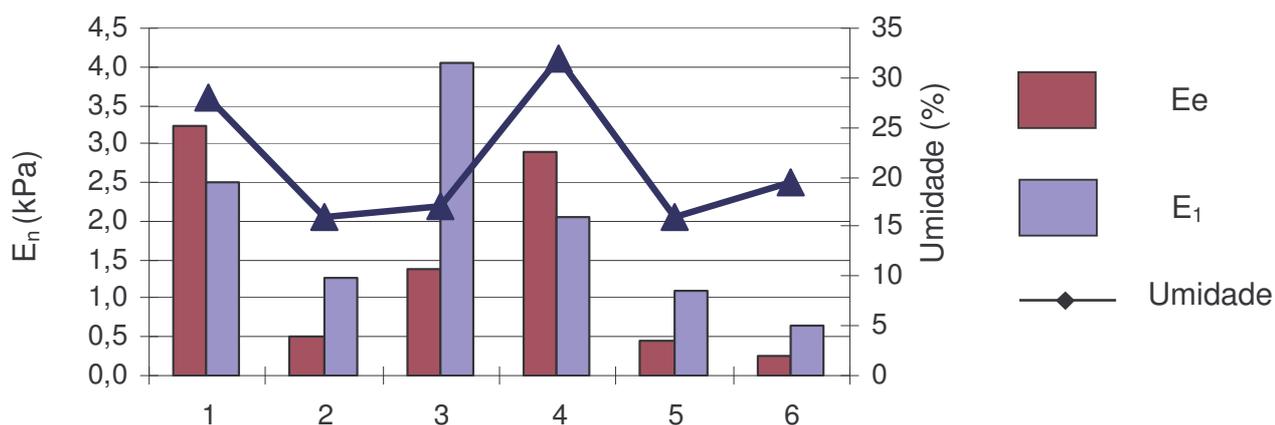
**Figura 4.6:** Módulos de viscosidade dos produtos. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.

Num estudo sobre os efeitos das variáveis de fabricação na textura de doce de manga, Soares Junior *et al* (2003) observaram dois comportamentos distintos com relação ao efeito do ácido. Nos processamentos com baixos teores de sólidos solúveis e polpa de manga, o aumento na porcentagem de ácido adicionado resultou em um produto mais rígido e, nos processamentos com teores mais altos, houve uma redução na rigidez. Isto se deve, no primeiro caso, à menor dissociação das carboxilas livres nas moléculas de pectina, levando a uma menor repulsão intermolecular e favorecendo as ligações cruzadas essenciais para a formação do gel. No segundo caso, o resultado é justificado pelo favorecimento da hidrólise da pectina pelo ácido, resultando em uma estrutura de gel descontínua ou simplesmente mais frágil.

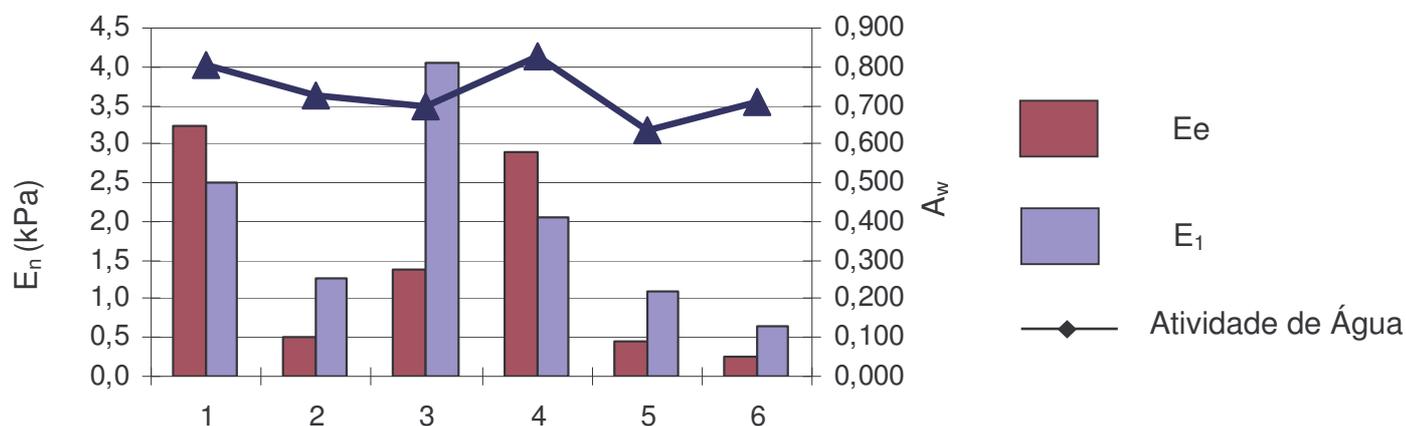
#### 4.2.1.1.4. EFEITOS DA UMIDADE E DA ATIVIDADE DE ÁGUA

É possível perceber pela Figura 4.7 que o efeito da umidade aparece mais nitidamente no parâmetro  $E_e$  e, especialmente nos processamentos sem adição de ácido, nos quais há uma queda acentuada nos seus valores juntamente com os teores de umidade. Com relação à atividade de água (Figura 4.8), os parâmetros elásticos aparentemente não foram afetados.

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram a influência do teor de umidade e da atividade de água sobre o tempo de relaxação ( $\lambda_1$ ). Vemos por estes gráficos que há uma relação mais clara destes fatores com o tempo de relaxação do que com os componentes elásticos. Podemos ver que as amostras com maior teor de umidade dissipam mais lentamente a tensão causada pela compressão.



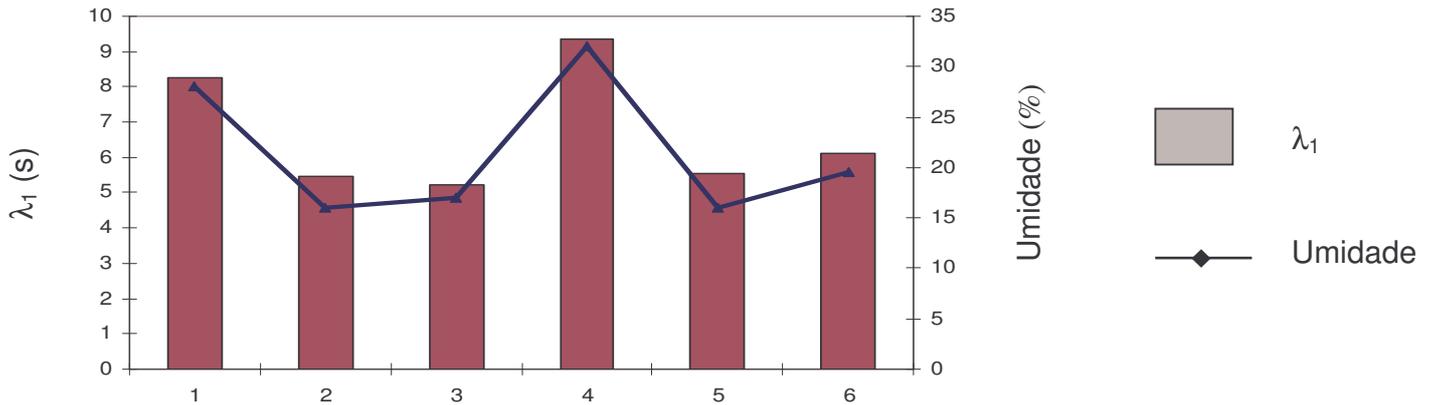
**Figura 4.7:** Módulos de elasticidade e teor de umidade dos produtos. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



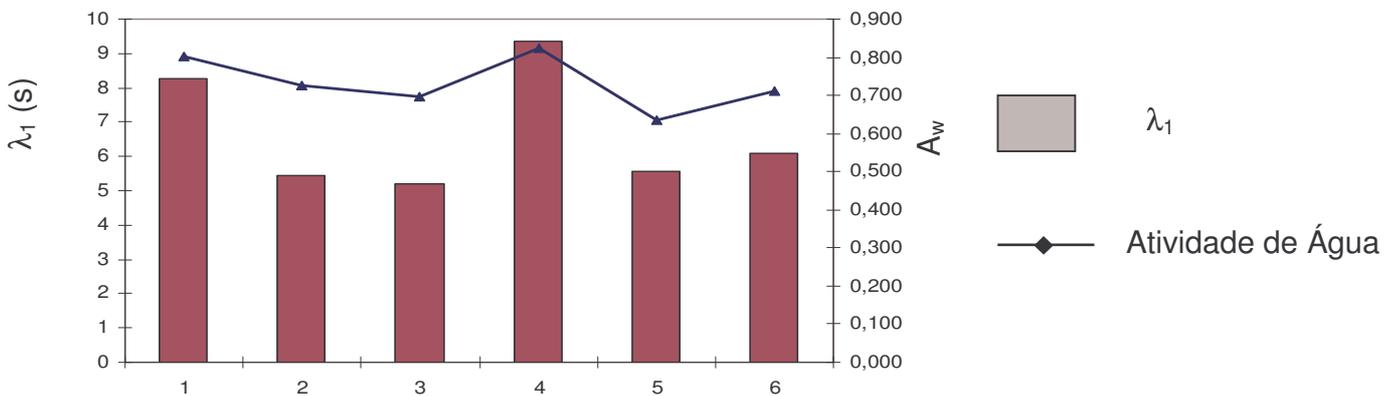
**Figura 4.8:** Módulos de elasticidade e atividade de água dos produtos. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.

#### 4. Resultados e Discussão

O efeito plasticizante da água, sobre o qual Slade & Levine (1988) discutem seus vários mecanismos possíveis, não foi observado neste trabalho. Ao contrário, observa-se que os processamentos onde foram encontrados teores de umidade mais altos tiveram maiores valores de  $E$  e de  $\lambda$ , prevalecendo a influência da sacarose.



**Figura 4.9:** Tempo de relaxação e teor de umidade dos produtos. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



**Figura 4.10:** Tempo de relaxação e atividade de água dos produtos. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.

#### 4.2.1.2. MODELO DE PELEG & NORMAND

Os parâmetros da equação 13 ( $k_1$  e  $k_2$ ) e os valores de  $R^2$  para o ajuste dos dados experimentais com este modelo são apresentados na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6:** Parâmetros para o modelo de Peleg & Normand. Processamentos 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.

Processamento	1	2	3	4	5	6
$k_1$ (s)	19,16	11,91	11,52	18,81	12,38	13,52
$k_2$	1,46	1,15	1,14	1,48	1,13	1,13
$R^2$	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

##### 4.2.1.2.1. EFEITO DA SACAROSE

Os dois parâmetros do modelo de Peleg & Normand foram afetados negativamente pela presença de sacarose na formulação, isto é, valores de  $k_1$  e  $k_2$  são mais baixos para os processamentos nos quais foi adicionada sacarose seguindo a tendência dos parâmetros elásticos e viscosos do Modelo de Maxwell Generalizado (Tabela 4.6 e Figura 4.12).

Também não foi observada nenhuma influência da concentração de sacarose e açúcares redutores nos parâmetros  $k_1$  e  $k_2$ .

##### 4.2.1.2.2. EFEITO DO AÇÚCAR INVERTIDO

A substituição de 5% da sacarose pelo xarope de açúcar invertido causou alteração mínima nos parâmetros deste modelo. Isto pode ser observado na Tabela 4.6.

#### **4.2.1.2.3. EFEITO DO ÁCIDO CÍTRICO**

Assim como a presença de açúcar invertido, a adição de ácido na formulação do doce não afetou os parâmetros deste modelo.

#### **4.2.1.2.4. EFEITOS DA UMIDADE E DA ATIVIDADE DE ÁGUA**

Analisando conjuntamente os resultados de teor de umidade e atividade de água com os valores dos parâmetros do modelo de Peleg & Normand, vemos que há uma relação tão clara quanto àquela da presença de sacarose na formulação, neste caso, uma relação diretamente proporcional.

Este resultado difere do encontrado por Gabas (2002) quando analisou as propriedades viscoelásticas de ameixas. Segundo este autor, os valores do parâmetro  $k_1$  são inversamente proporcionais aos de atividade de água enquanto que  $k_2$  se mostrou praticamente inalterado.

Embora os valores de  $R^2$  para o modelo de Peleg & Normand sejam altos, é interessante notar que os parâmetros deste modelo estão relacionados com o tempo de relaxação, que é uma relação entre os parâmetros viscosos e elásticos, mas não dá informação sobre estas propriedades isoladamente.

Na Tabela 4.7 apresenta os valores de  $R^2$  para os quatro modelos matemáticos testados. Dentre os modelos de Maxwell, observa-se que há um aumento considerável no seu valor quando o modelo passa de um para dois elementos. Já quando se passa de dois para três elementos, esta variação é mínima.

**Tabela 4.7:** Valores de  $R^2$  para os modelos matemáticos testados. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.

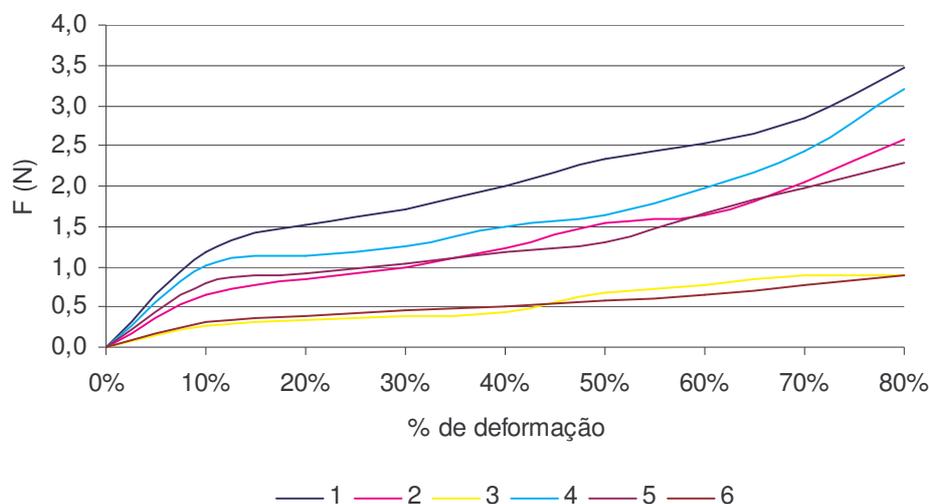
Processamento	Maxwell com 3 Elementos	Maxwell com 5 Elementos	Maxwell com 7 Elementos	Peleg & Normand
1	0,85	0,94	0,95	0,99
2	0,85	0,95	0,97	0,99
3	0,83	0,94	0,95	0,99
4	0,83	0,92	0,92	0,99
5	0,83	0,95	0,96	0,99
6	0,84	0,94	0,95	0,99

O modelo de Peleg & Normand, que utiliza valores de tensão normalizados, foi o que apresentou melhores valores de  $R^2$ . No entanto, como já foi mencionado, este modelo não dá informação sobre propriedades elásticas e viscosas. Este modelo possui a vantagem de poder ser utilizado para deformações maiores que as do intervalo de viscoelasticidade linear, isto é, no intervalo onde há uma relação linear entre a deformação aplicada e a tensão resultante.

#### 4.2.2. TESTE DE RUPTURA POR COMPRESSÃO

Na Figura 4.11 são apresentadas as curvas obtidas através do teste de ruptura por compressão. Pode-se observar que não há marcas claras de ruptura na estrutura. Apenas nos processamentos sem açúcar (1 e 4) é que há uma pequena inflexão na curva quando se atinge aproximadamente 10% de deformação. Nota-se também que há um agrupamento segundo a formulação desconsiderando-se a presença de ácido. No primeiro grupo, com valores de força mais baixos, estão os processamentos com açúcar invertido (3 e 6), no grupo

intermediário estão os processamentos com sacarose (2 e 5) e, com valores mais altos, aparecem os processamentos sem açúcar (1 e 3).



**Figura 4.11:** Força na compressão em função da deformação aplicada. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.

Este resultado está de acordo com o encontrado por Nussinovitch *et al* (2001) que, em estudo sobre o efeito da formulação nas propriedades mecânicas de géis liofilizados, aplicando deformações de 40 e 60%, concluiu que a presença de sacarose diminui a rigidez dos géis. Eles sugerem que a presença de sacarose na matriz sólida do gel pode interferir na sua integridade mecânica.

Os processamentos 1 e 3 também apresentaram os valores mais elevados de tensão no equilíbrio ( $E_e$ ) nos modelos de Maxwell, e das constantes  $k_1$  e  $k_2$  do modelo de Peleg & Normand, ambos no teste de relaxação de tensão; e também no de teor de umidade e no de atividade de água.

### 4.3. ANÁLISE SENSORIAL

Em trabalhos como o de Damásio (1990), foram realizadas análises instrumentais (TPA) e sensoriais com o objetivo de se caracterizar a textura de algum produto. Em outros trabalhos, já citados no Capítulo 2: Revisão Bibliográfica, como os de Gabas (2002) e de KAUR *et. al.* (2002), a análise sensorial é utilizada para detectar diferenças e preferências. Neste trabalho foi realizado o teste de preferência para buscar tendências dentro das avaliações.

Na Tabela 4.8 estão os valores médios das notas dadas no teste de preferência na avaliação sensorial das amostras para os atributos textura tátil, textura visual, aroma, cor, sabor e textura oral. A mesma letra na mesma coluna indica que não há diferença significativa.

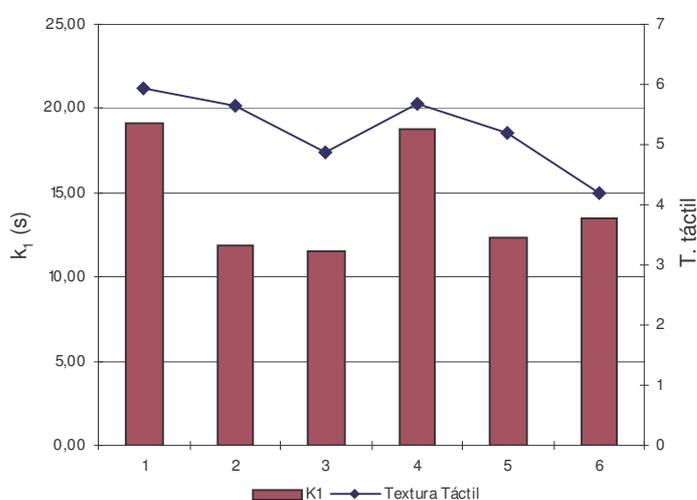
**Tabela 4.8:** Médias das notas da avaliação sensorial dos produtos. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.

Amostra	Textura Tátil	Textura Visual	Aroma	Cor	Sabor	Textura Oral
1	5,93 <sup>a</sup>	3,35 <sup>c</sup>	4,94 <sup>ab</sup>	4,52 <sup>c</sup>	5,20 <sup>bc</sup>	4,30 <sup>b</sup>
2	5,63 <sup>a</sup>	6,37 <sup>a,b</sup>	6,12 <sup>a</sup>	6,56 <sup>a</sup>	6,72 <sup>ab</sup>	6,33 <sup>a</sup>
3	4,87 <sup>b</sup>	6,78 <sup>a</sup>	6,39 <sup>a</sup>	7,20 <sup>a</sup>	6,77 <sup>ab</sup>	6,59 <sup>a</sup>
4	5,68 <sup>a</sup>	6,19 <sup>b</sup>	4,40 <sup>b</sup>	5,06 <sup>bc</sup>	2,68 <sup>d</sup>	5,26 <sup>ab</sup>
5	5,20 <sup>a,b</sup>	5,90 <sup>a,b</sup>	5,81 <sup>ab</sup>	6,36 <sup>ab</sup>	4,75 <sup>c</sup>	5,91 <sup>ab</sup>
6	4,18 <sup>b</sup>	7,20 <sup>a</sup>	6,15 <sup>a</sup>	7,21 <sup>a</sup>	6,84 <sup>a</sup>	6,88 <sup>a</sup>

Com relação à textura tátil, atributo avaliado através do sentido do tato, mesmo não havendo diferença significativa entre os processamentos 1, 2, 4 e 5, vemos uma tendência pela preferência pelos produtos dos processamentos sem açúcar (1 e 4). Isto coincide com os valores mais elevados do parâmetro  $k_1$  do

modelo de Peleg & Normand, e com os parâmetros  $E_e$  e  $\lambda_1$  do modelo de Maxwell generalizado. Isto indica uma preferência pelos produtos com maior característica elástica, como pode ser observado na Figura 4.12 e no Apêndice nas Figuras Ap. 6, 9a e 14. Na avaliação do atributo textura oral estas relações não foram observadas (Figuras Ap. 5, 9b e 14).

Com relação aos outros atributos, não foi verificada nenhuma tendência que possa ser comparada aos resultados das análises reológicas. Suas avaliações podem ser observadas também nas Figuras Ap. 16 a 18.



**Figura 4.12:** Parâmetro  $k_1$  do modelo de Peleg & Normand e médias das notas de textura tátil dos produtos. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa, sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.

## 5. CONCLUSÕES

O efeito plasticizante da sacarose foi demonstrado pelos resultados obtidos nos testes de relaxação de tensão, nos quais as constantes elásticas obtidas foram mais elevadas nos processamentos sem adição deste ingrediente.

Não foram perceptíveis os efeitos da adição de ácido cítrico e da substituição da 5% da sacarose pelo xarope de açúcar invertido.

Dos modelos matemáticos testados, o de Peleg & Normand foi o que apresentou melhor ajuste aos valores obtidos experimentalmente. A seguir vieram os modelos de Maxwell generalizados com sete e cinco elementos com uma diferença de aproximadamente 0,01 no valor de  $R^2$  entre eles em favor do primeiro.

Não foi observado sinal de ruptura, que é caracterizado por uma inflexão repentina da curva Força versus Deformação em nenhuma das formulações testadas, não podendo, portanto serem determinados os parâmetros tensão e deformação na ruptura.

## **6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

Devido à diferença entre o aspecto dos produtos obtidos, o controle de ponto final do produto pela medida de concentração de sólidos solúveis mostrou-se não ser o mais indicado. Para trabalhos futuros seria interessante o controle de textura para vários tempos de processamento, concentrações de sólidos e outros ingredientes como pectina.

Avaliação da textura por provadores treinados e por microscopia também seria interessante para confrontar com resultados de medidas instrumentais.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.O.A.C. Official methods of analysis, 13ed. **Association of Official Analytical Chemists**. Washington, 1984.

ALMEIDA, J. de. Valor Nutritivo da Banana. **O Solo**, ano XXVI nº 5/6/738;p. 80-100, 1934.. Apud: BLEINROTH, E. W. Matéria-Prima. In: **Banana: Cultura, Matéria-Prima, Processamento e Aspectos Econômicos**. Campinas, ITAL, 1985. Cap. 1, p. 1- 132

BARGALE, P. C., IRUDAYARAJ, J., MARQUIS, B. Studies on Rheological Behavior of Canola and Wheat. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v. 61 p. 267-274, 1995

BOURNE, M. C. **Food texture and viscosity**: concept and measurement. New York: Academic Press, 1982. 325 p.

BOURNE, M. C. Texture profile of ripening pears. **Journal of Food Science**, Chicago, p. 223-226, 1968

BRANDT, M. A.; SKINNER, E. Z.; CONNAN, J. A. Texture profile method. **Journal of Food Science**. Chicago, v. 28, p. 404-409, 1963

BRENNAN, J. G. Texture perception and measurement. In: PIGGOTT, J. R. (Ed) **Sensory Applied**. Science Publ.,1984. p.59-91.

BUDIMAN, M., STROSHINE, R. L., CAMPANELLA, O. H. Stress Relaxation and Low Field Proton Magnetic Resonance Studies of Cheese Analog. **Journal of Texture Studies** V. 31 p. 477-498, 2000

COSTELL, E., FISZMAN, S. M., DURÁN, L. Propiedades Físicas I, Reología de Sólidos y Textura. In: AGUILERA, J. M. (Ed.). **Temas em Tecnologia de Alimentos**, CYTED –Programa Iberoamericano de Ciencia e Tecnologia para el desarrollo, 1997. Cap. 6, p. 213 – 259

CUNHA, C. R. **Efeito do uso de retentados de baixo fator de concentração no rendimento, proteólise e propriedades viscoelásticas de queijo minas frescal de reduzido teor de gordura**. Campinas, 2002. 177p. Dissertação (Mestrado) – FEA UNICAMP

DAMASIO, M. H. **Medidas das propriedades mecânicas e da textura de géis mistos K-carragenato-goma garrafim-goma guar. Influência da composição e relação entre dados instrumentais e sensoriais**. Campinas, 1990. 263p. Tese (Doutorado) FEA-UNICAMP

KRAMER, A. **Food Texture – Definition, Measurements and Relations to Other Attributes of Food Quality Attributes** In: KRAMER, A.; SZCZESNIAK, A. S. (Ed). *Texture Measurements o Food*. Amsterdam. D. Reidel, 1973 Chap. 1. p.1-9 Apud: FREITAS, S. M. L. **Utilização de alginato de sódio em texturizados de suco misto de laranja e cenoura de valor energético reduzido**. Campinas, 1999. Dissertação (mestrado) – FEA-UNICAMP

FRIEDMAN, H. H.; WHITNEY, J. E.; SZCZESNIAK, A. S. The Texturometer- a new instrumente for objetive measurement. **Journal of Food Science**, Chicago. V. 28, p. 390-396, 1963

GABAS, A. L., **Influência das Condições de Secagem de Ameixa (*Prunus dmestica*) na Qualidade do Produto Final**. Campinas, 2002. Tese (doutorado) – FEA - UNICAMP

JACKIX, M. H. **Industrialização de Frutas em Calda, Cristalizadas, Geléias e Doces em Massa**. Série Tecnologia Agroindustrial (1982) Secretaria de Indústria e Comércio, Governo do Estado de São Paulo, 254 p.

KAUR, L., SINGH, N., SODHI, N. S., GUJRAL, H. S. Some Properties of potatoes and their starches I. Cooking, Textural and rheological properties of potatoes. **Food Chemistry** V. 79 p. 177-181, 2002

LEWICKI, P. P.; SPIESS, W. E. L. Rheological Properties of Raisins Part I. Compression Test. **Jornal of Food Engineering** V. 24 p.321-338, 1994

LIMA, I. & SINGH, R. P. Viscoelastic Behavior of Fried Potato Crust. **Journal of Texture Studies** Trumbull, Connecticut V. 32 p. 131-141, 2001

LIMANOND, B., CASTELL-PEREZ, M. E., MOREIRA, R. G. Quantifying texture changes in tortillas due to staling **Journal of Texture Studies** Trumbull, Connecticut V. 33 p. 35-44, 2002

MEDINA, J. C. Cultura. In: Banana: **Cultura, Matéria-Prima, Processamento e Aspectos Econômicos**. Campinas, ITAL, 1985. Cap. 1, p. 1- 132.

NUSSINOVICHTH, A., CORRADINI, M, G., NORMAND, M. D., PELEG, M. Effect of Starch, Sucrose and Their Combinations on the Mechanical and Acoustic Properties of Freeze-Dried Alginate Gels. **Food Research International**, v.34, p.871-878, 2001.

PELEG, M., NORMAND M. D., Comparison of Two Methods for Stress Relaxation Data Presentation of Solid Foods. **Rheologica Acta**, V. 22 p. 108-113, 1983

PELEG, M. & POLLAK, N. The problem of equilibrium conditions in stress relaxation analysis of solid foods. **Journal of Texture Studies**, V. 13, p. 1-11, 1982

SCOTT BLAIR, G. W. Rheology in food research. **Advances in Food Research**. New York, v. 8 p. 1-56, 1958

SLADE, L.; LEVINE, H. Structural Stability of Intermediate Moisture Foods – A New Understanding? In: BLANSHARD, J. M. V. ; MITCHELS, J. R., (Ed) **Food Structure – It's Creation and Evaluation** Chap. 8 p. 115-147, 1988

SOARES JUNIOR, A. M.; MAIA, A. B. R. A.; NELSON, D. L. Estudo de Algumas Variáveis de Fabricação no Perfil Textuométrico do Doce de Manga. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 23 (1) p. 76-80, jan.-abr. 2003

SHELLHAMMER, T. H., RUMSEY, T.R., KROCHTA, J. M. Viscoelastic Properties of Edible Lipids. **Journal of Food Engineering**, v. 33 p. 305-320, 1997

SZCZESNIAK, A. S. Classification of Textural Characteristics. **Journal of Food Science**. v. 28, p. 385-409, 1963

SZCZESNIAK, A. S. General foods texture profile revised: Ten years perspective. **Journal of Texture Studies**. v. 6, p. 5-17, 1975a

SZCZESNIAK, A. S. Textural characterization of temperature sensitive foods. **Journal of Texture Studies**. v. 6, p. 139-156, 1975b

STEFFE, J. F. Viscoelasticity, p. 294-348 In: **Rheological Methods in Food Processing Engineering**, Freeman Press, 1992

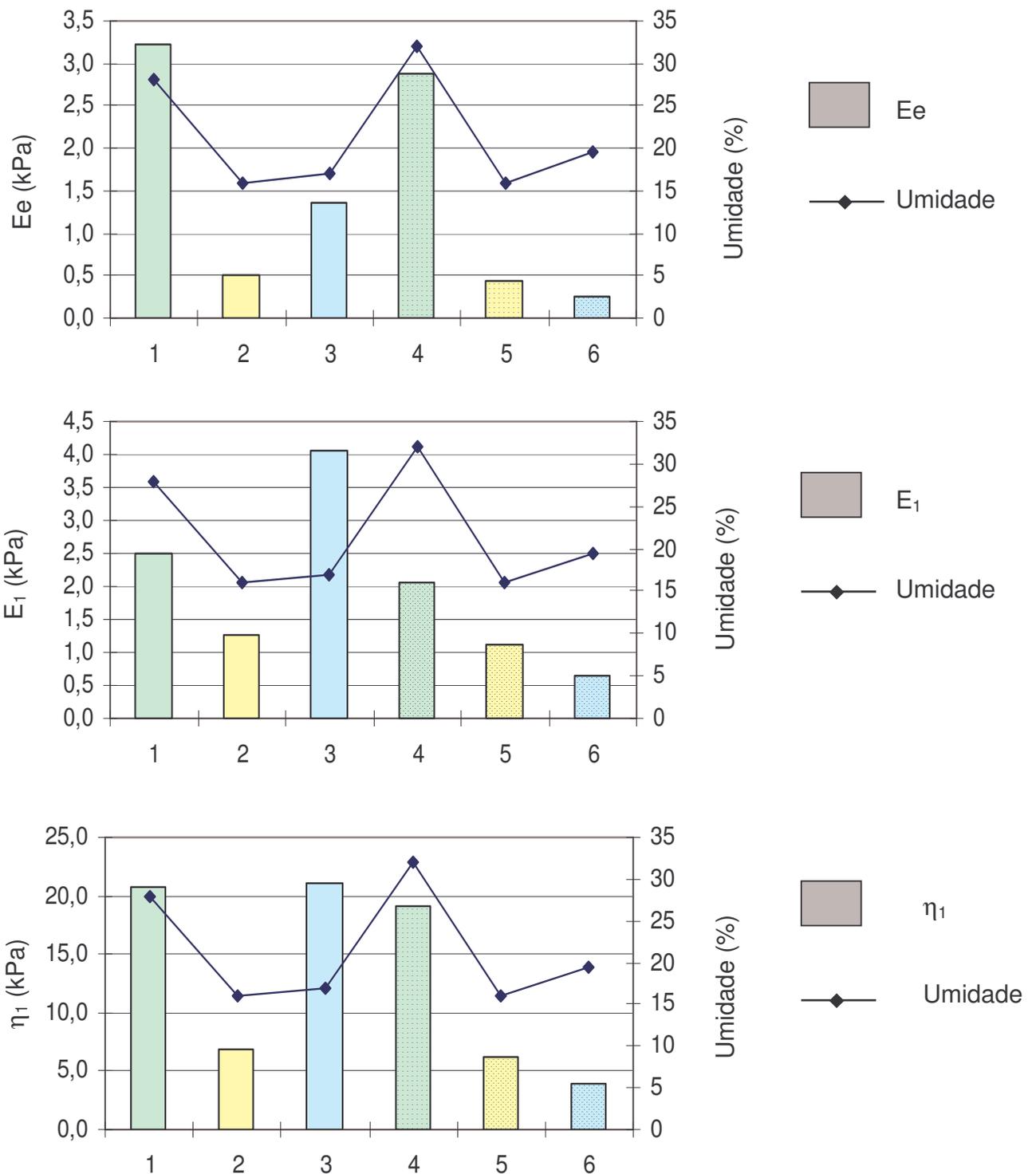
TANG, J. TUNG, M. A. ZENG, Y. Characterization of Gellan Gels Using Stress Relaxation. **Journal of Food Engineering**, v.38, p. 279-295, 1998

WANG, Y. J. TRUONG, V. D. WANG, L. Structures and rheological properties of corn starch as affected by acid hydrolysis. **Carbohydrate Polymers** V. 52, p.327-333, 2002

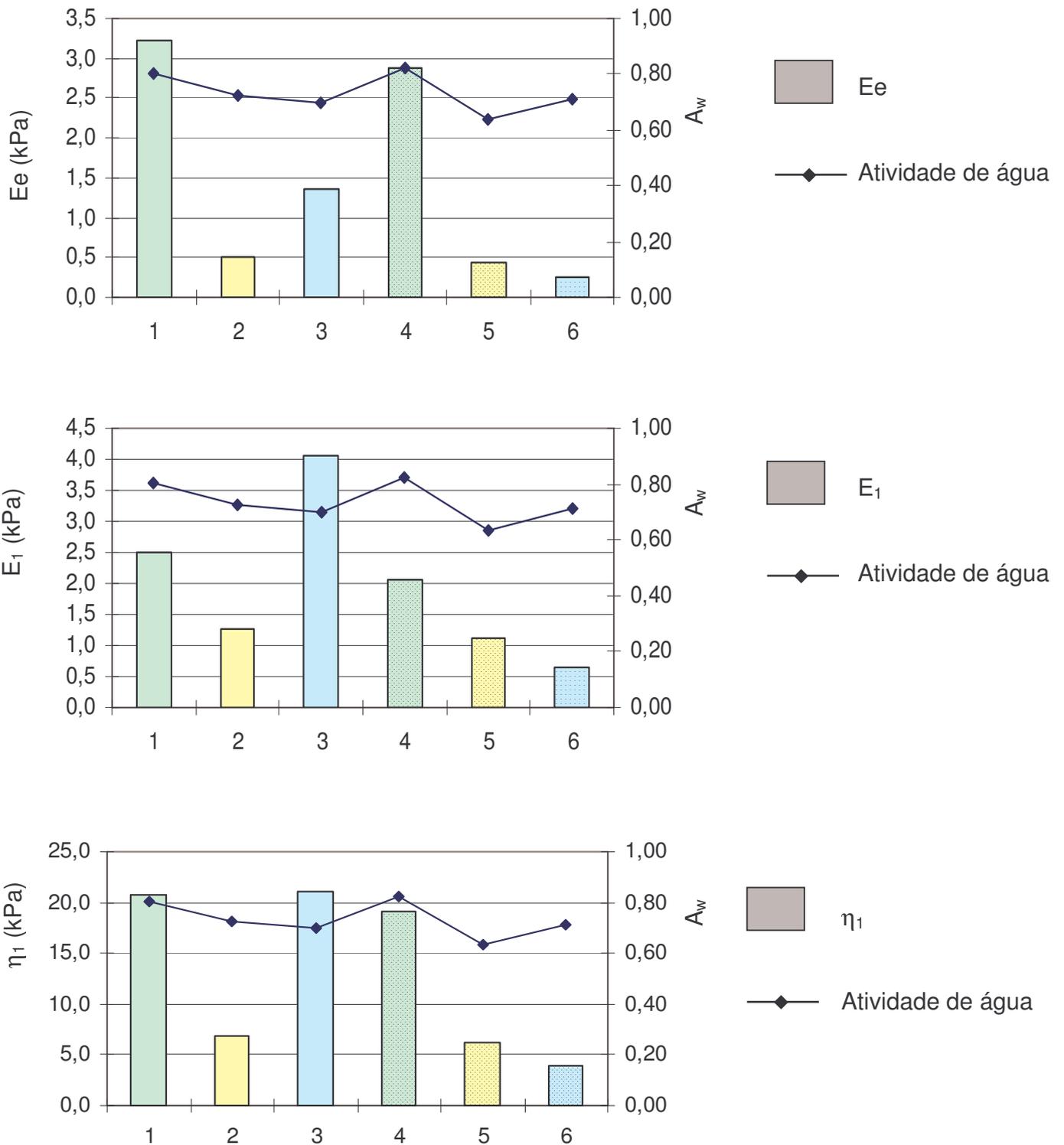
CEASA CAMPINAS, Centrais de Abastecimentos de Campinas S. A. Disponível em: <http://www.ceasacampinas.com.br>; Padronização/ Banana. Acesso em 31 de março de 2004.

FAO (Food and Agriculture Organization). Disponível em <http://apps1.fao.org> Acesso em 31 mar. 2004.

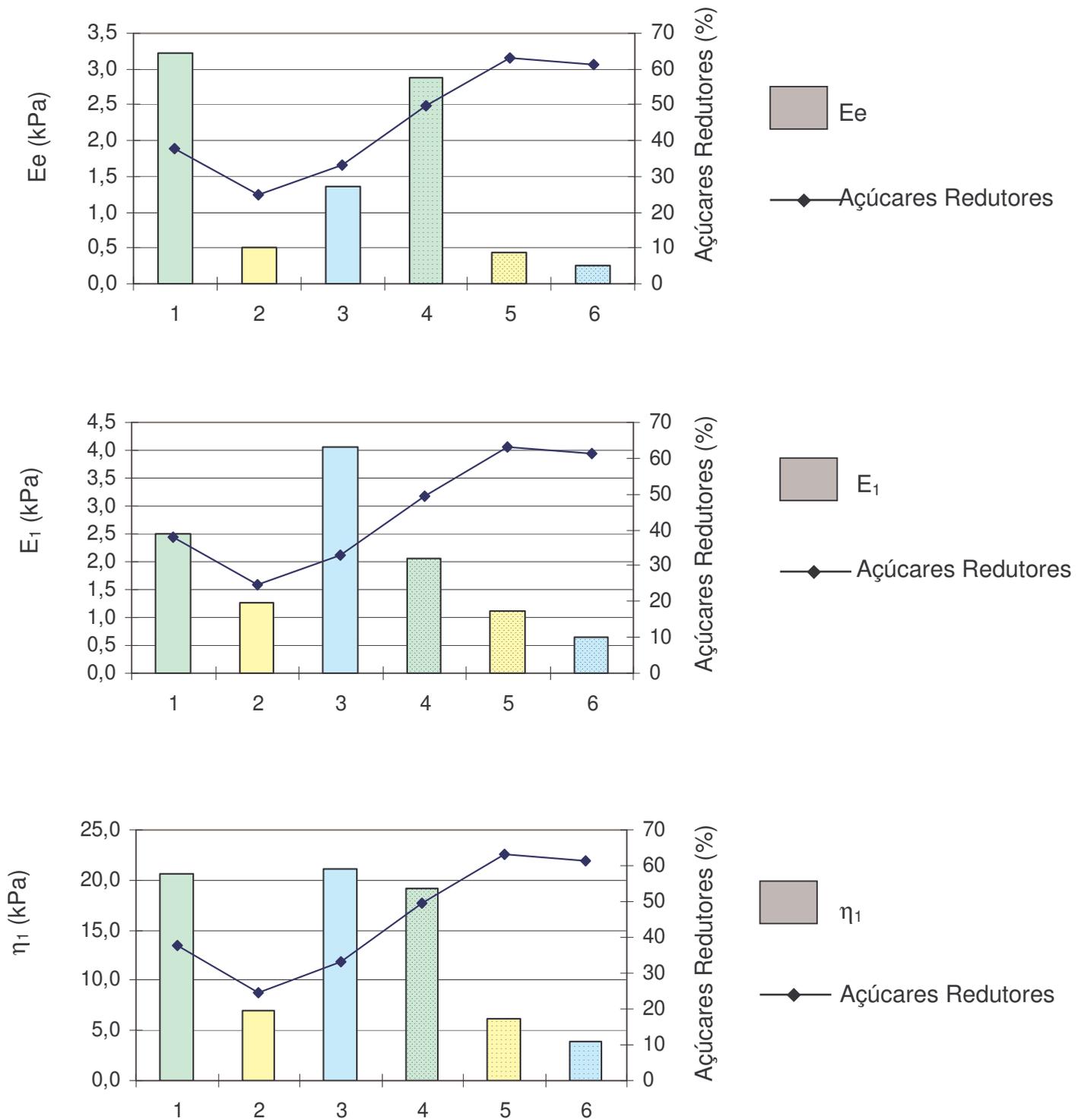
# APÊNDICE



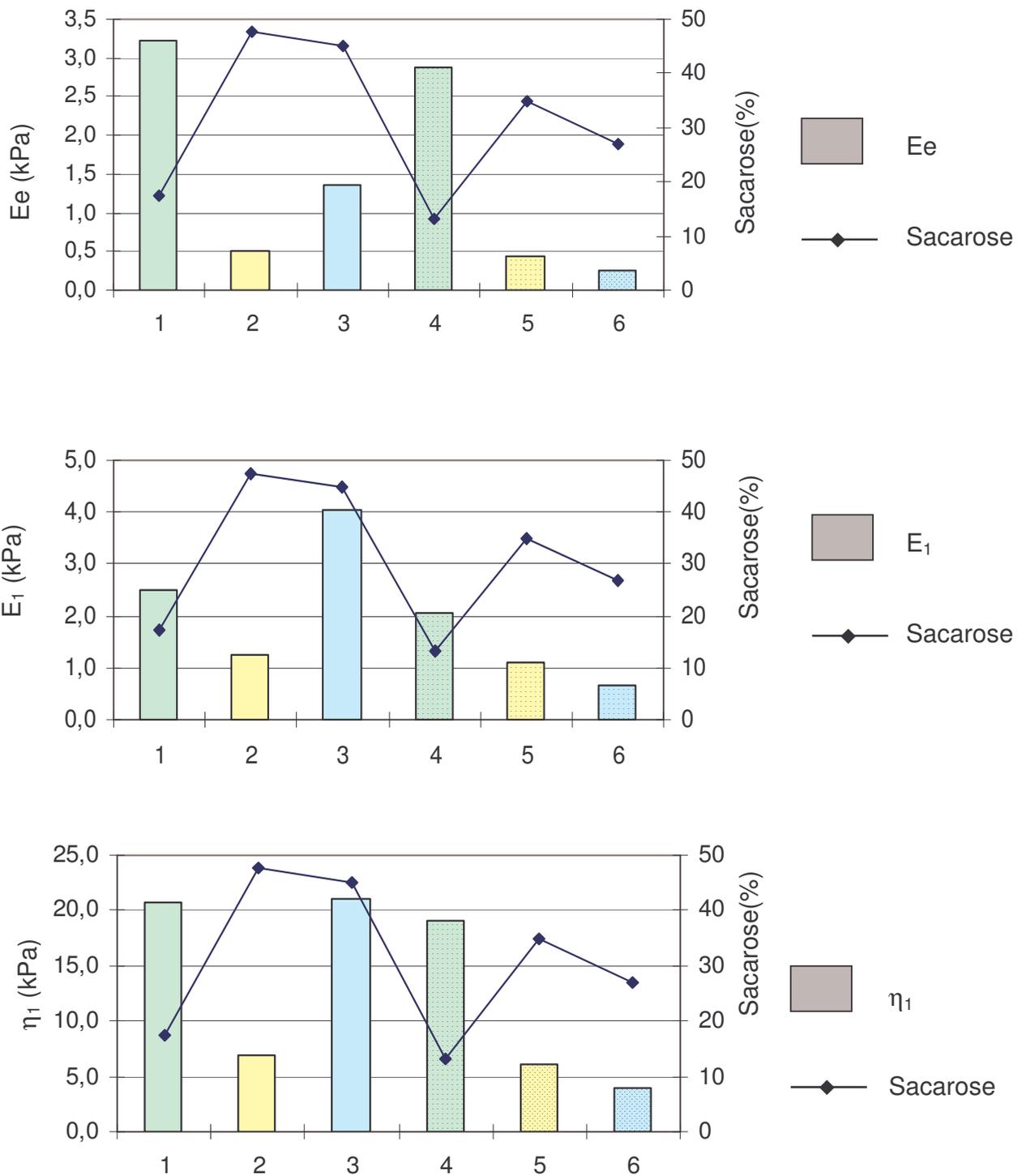
**Figura Ap.1:** Parâmetro do modelo de Maxwell generalizado  $E_e$ (a),  $E_1$  (b) e  $\eta_1$  (c) e teor de umidade. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



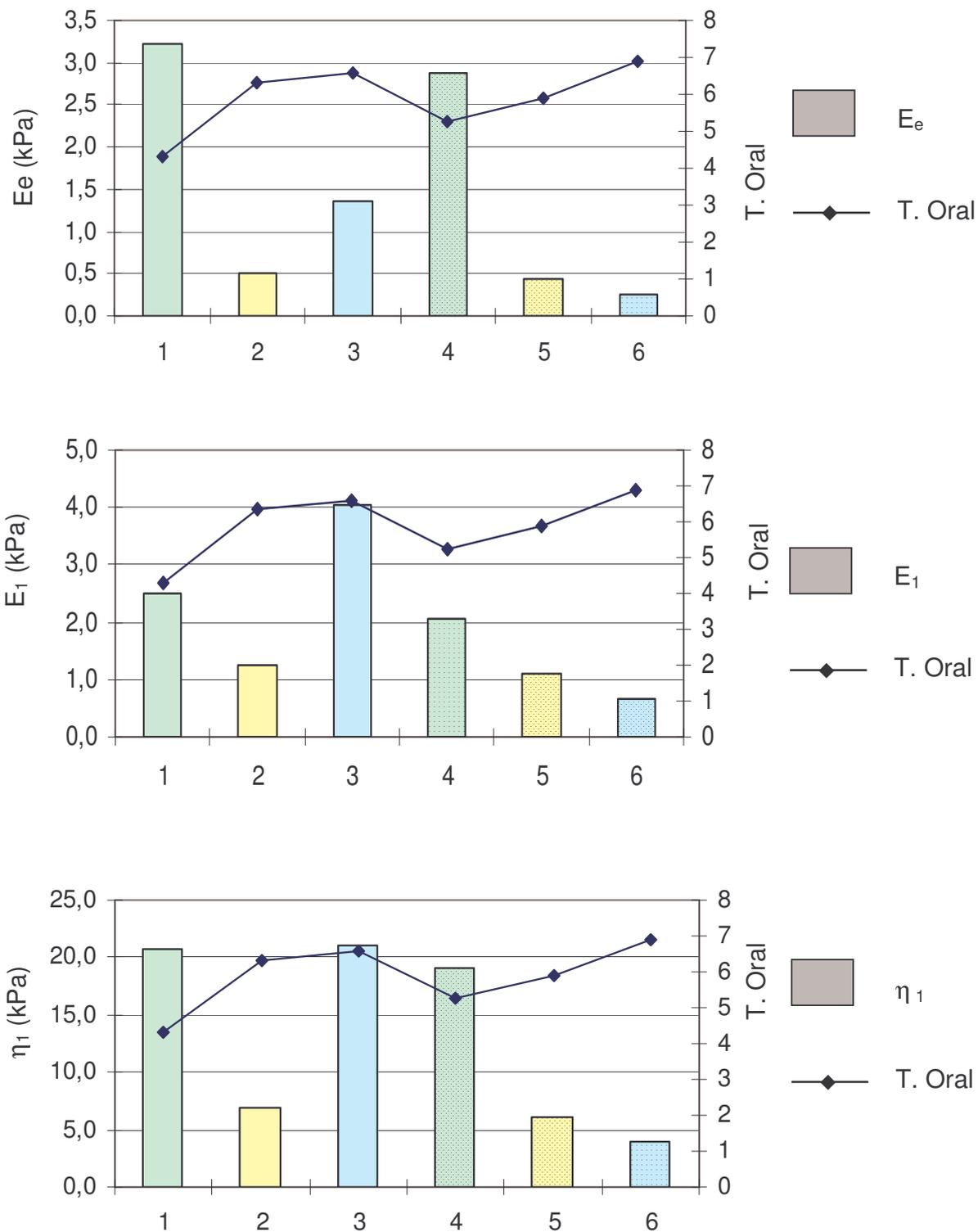
**Figura Ap.2:** Parâmetro do modelo de Maxwell generalizado E<sub>e</sub>(a), E<sub>1</sub> (b) e η<sub>1</sub> (c) e atividade de água. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



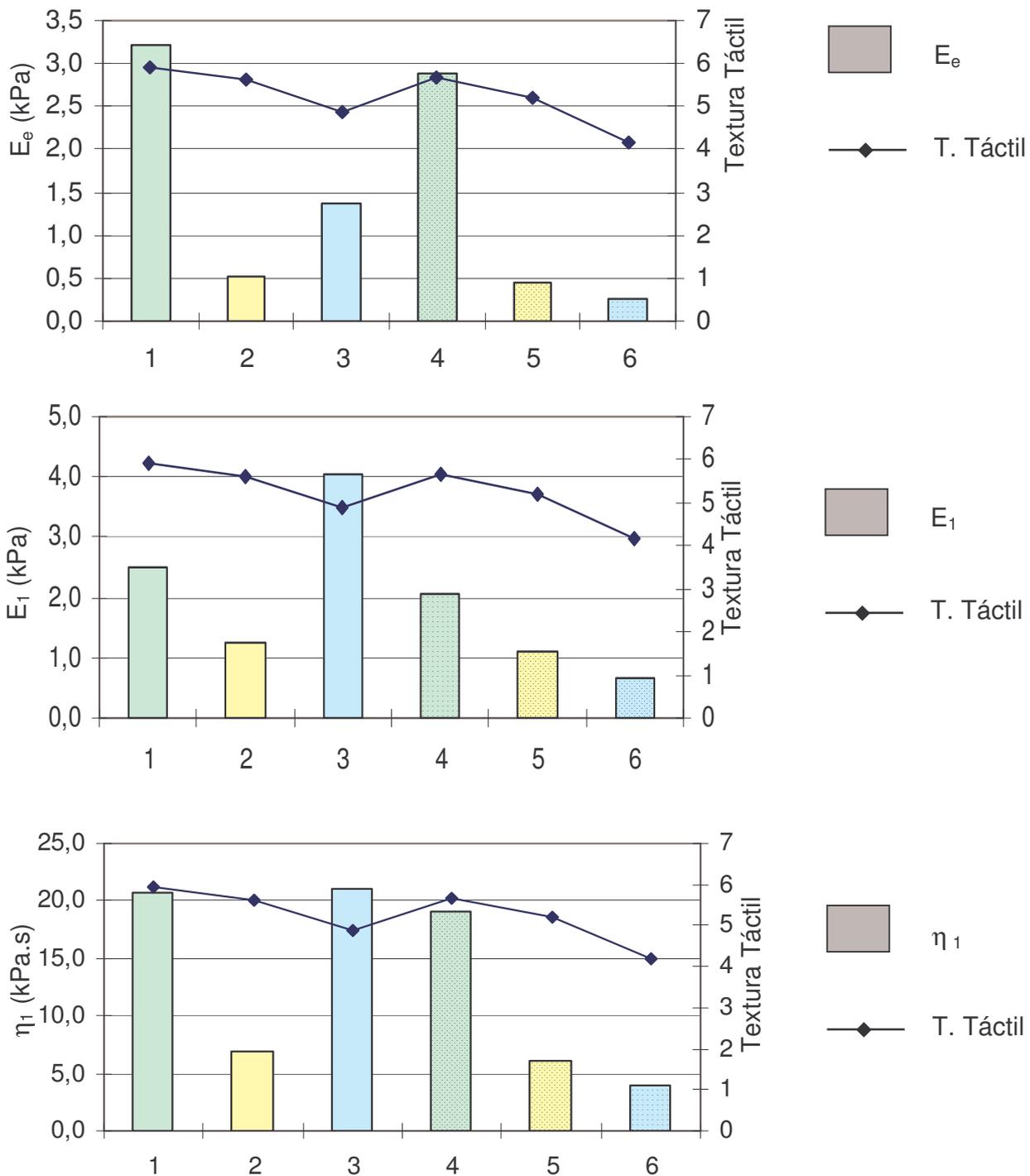
**Figura Ap.3:** Parâmetro do modelo de Maxwell generalizado E<sub>e</sub>(a), E<sub>1</sub> (b) e η<sub>1</sub> (c) e teor de açúcares redutores. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



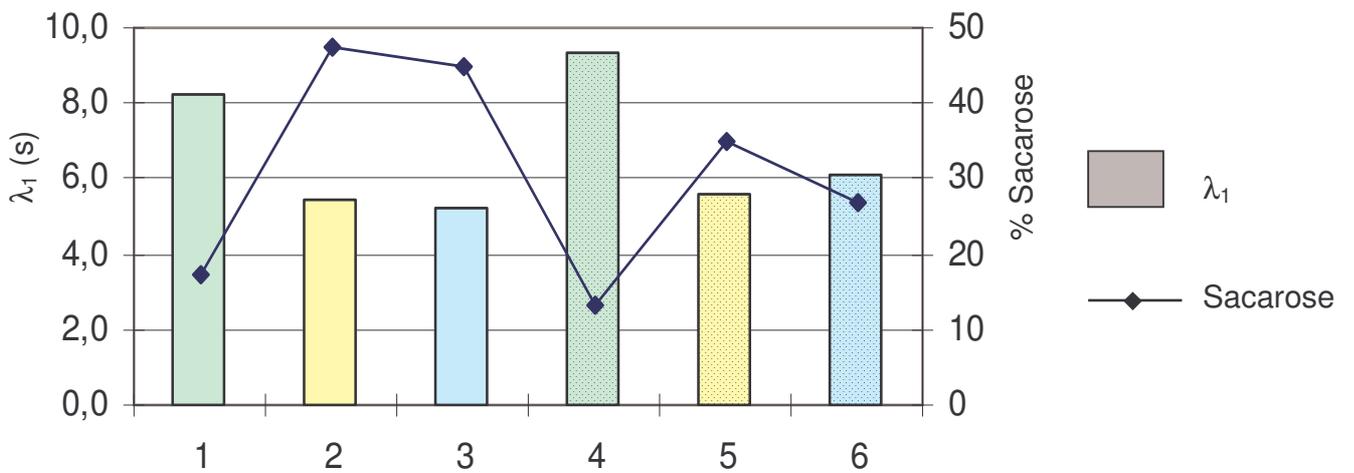
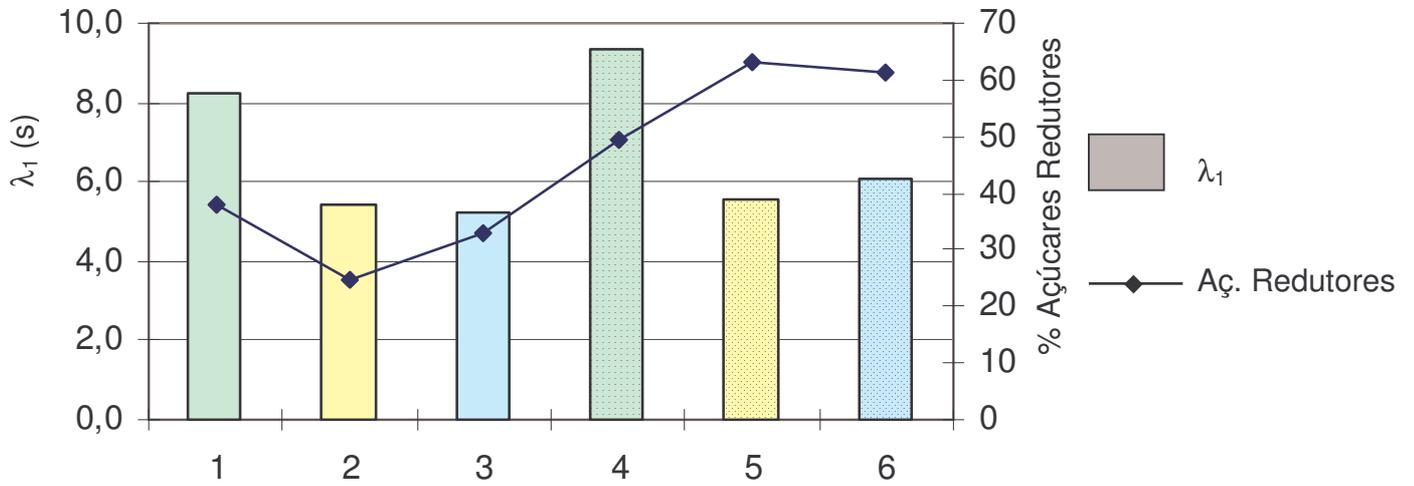
**Figura Ap.4:** Parâmetro do modelo de Maxwell generalizado  $E_e$ (a),  $E_1$  (b) e  $\eta_1$  (c) e teor sacarose. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



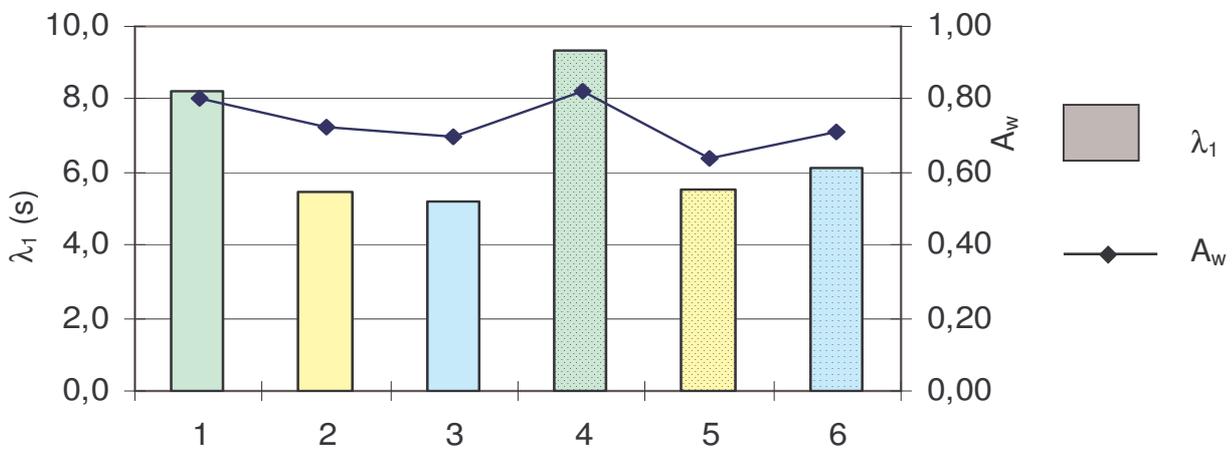
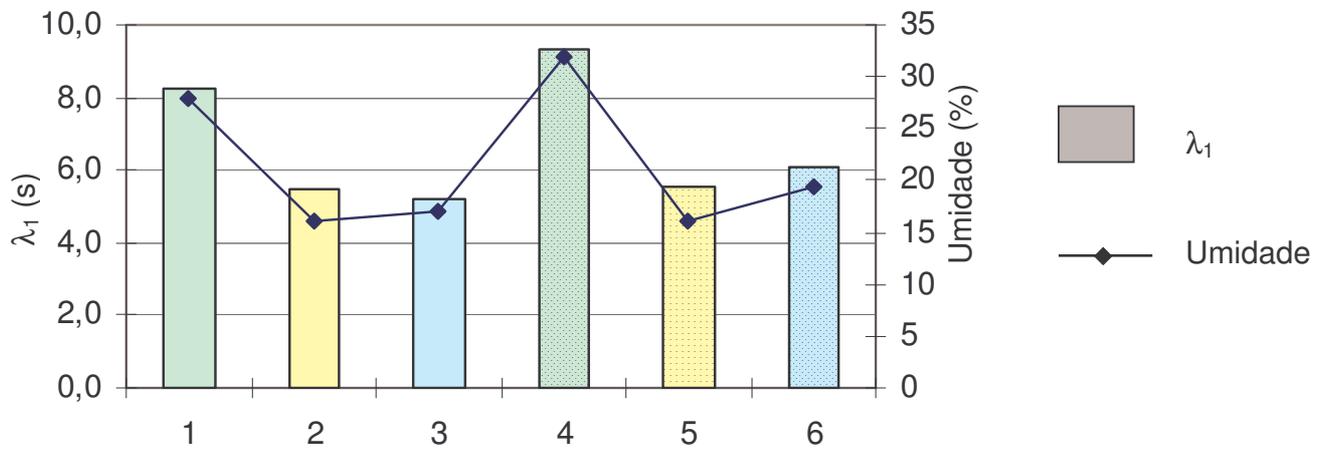
**Figura Ap. 5:** Parâmetro do modelo de Maxwell generalizado  $E_e$ (a),  $E_1$  (b) e  $\eta_1$  (c) e média das notas para textura oral dadas na análise sensorial. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



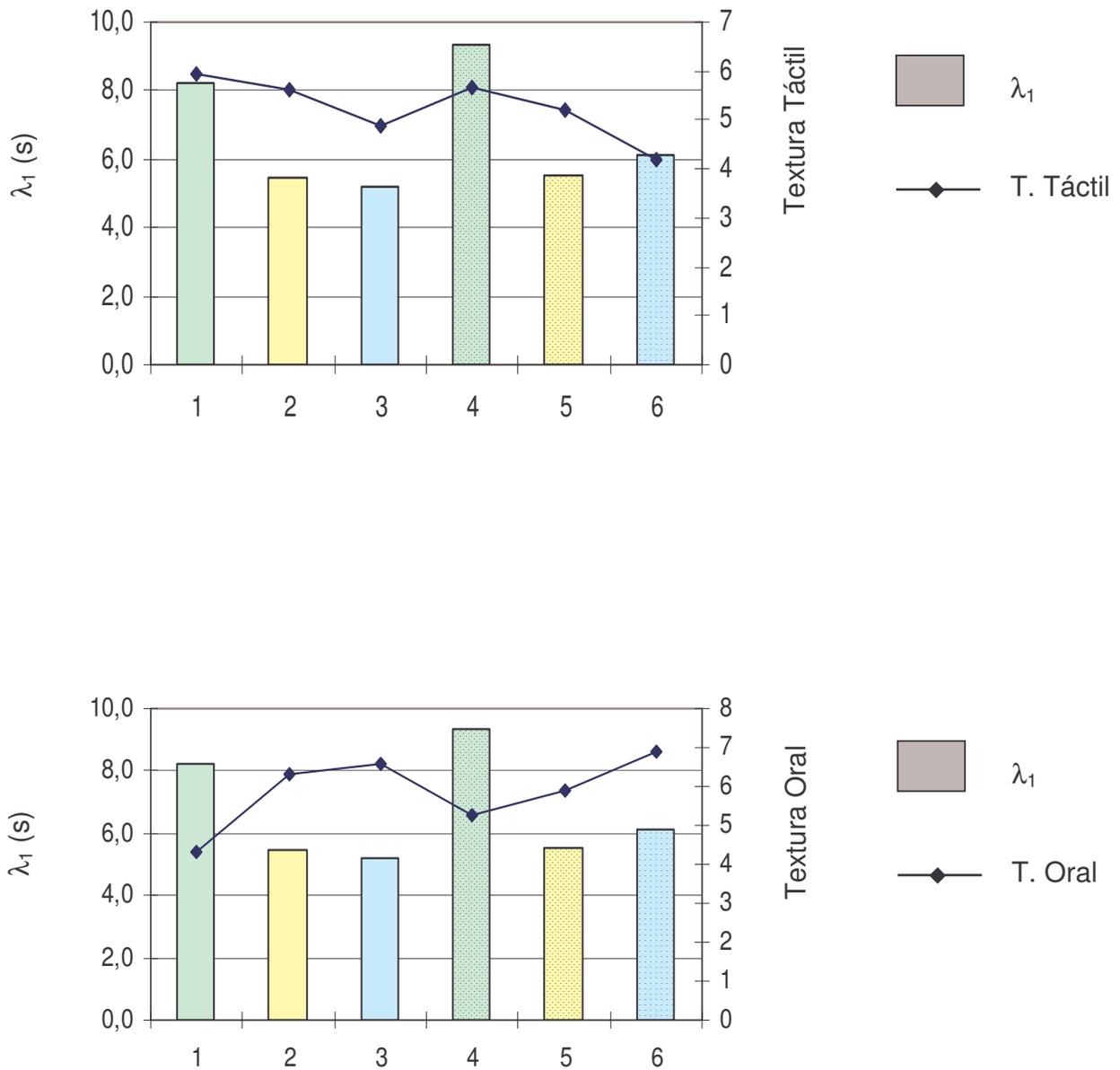
**Figura Ap. 6:** Parâmetro do modelo de Maxwell generalizado  $E_e$ (a),  $E_1$  (b) e  $\eta_1$  (c) e médias das notas de textura táctil na análise sensorial. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



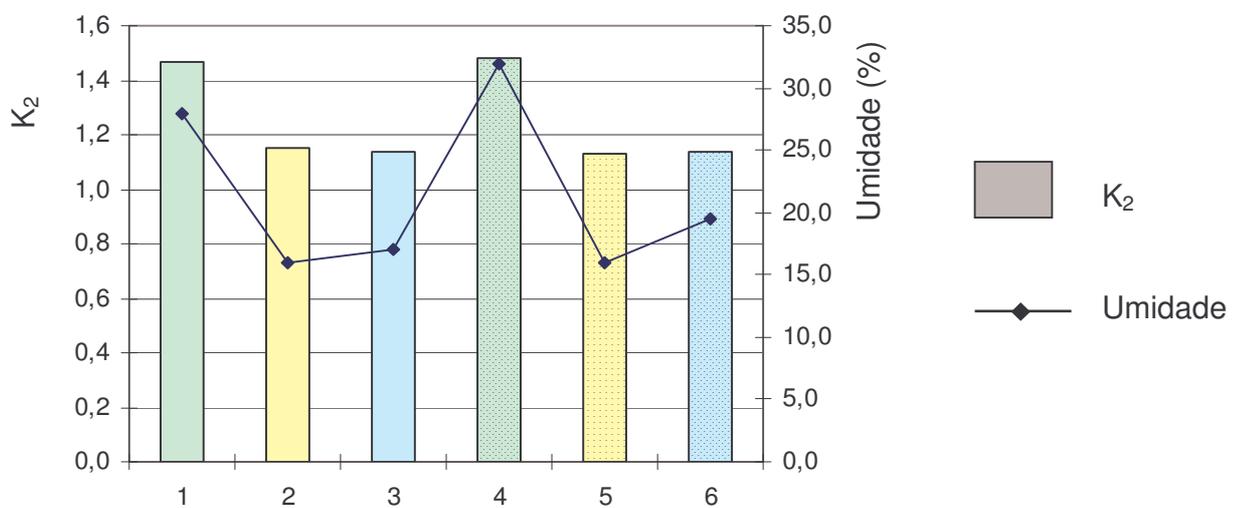
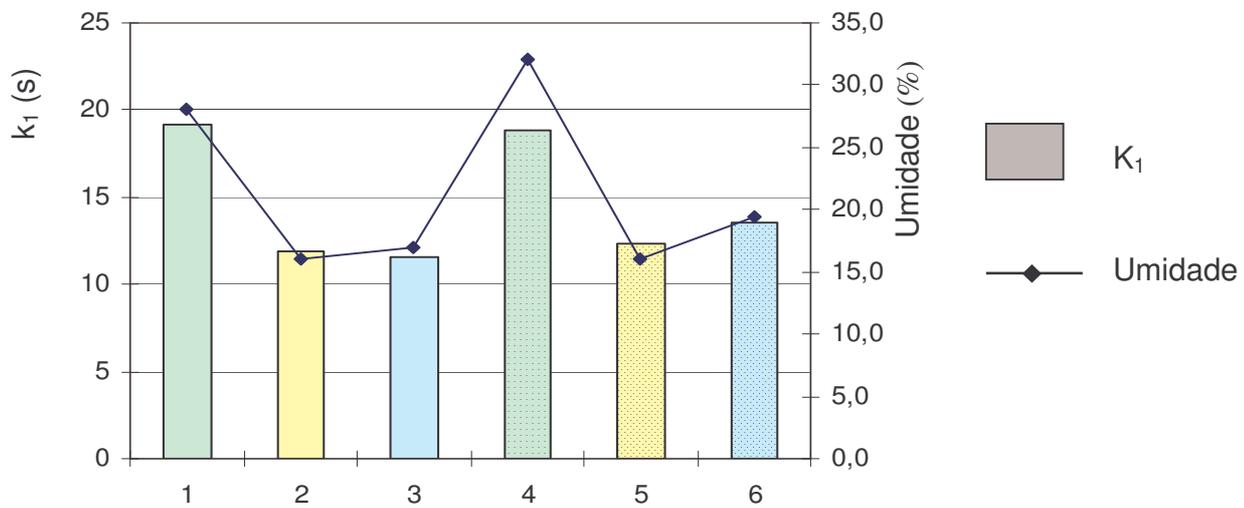
**Figura Ap. 7:** Tempos de relaxação e teor de açúcares redutores (a) e sacarose (b). Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



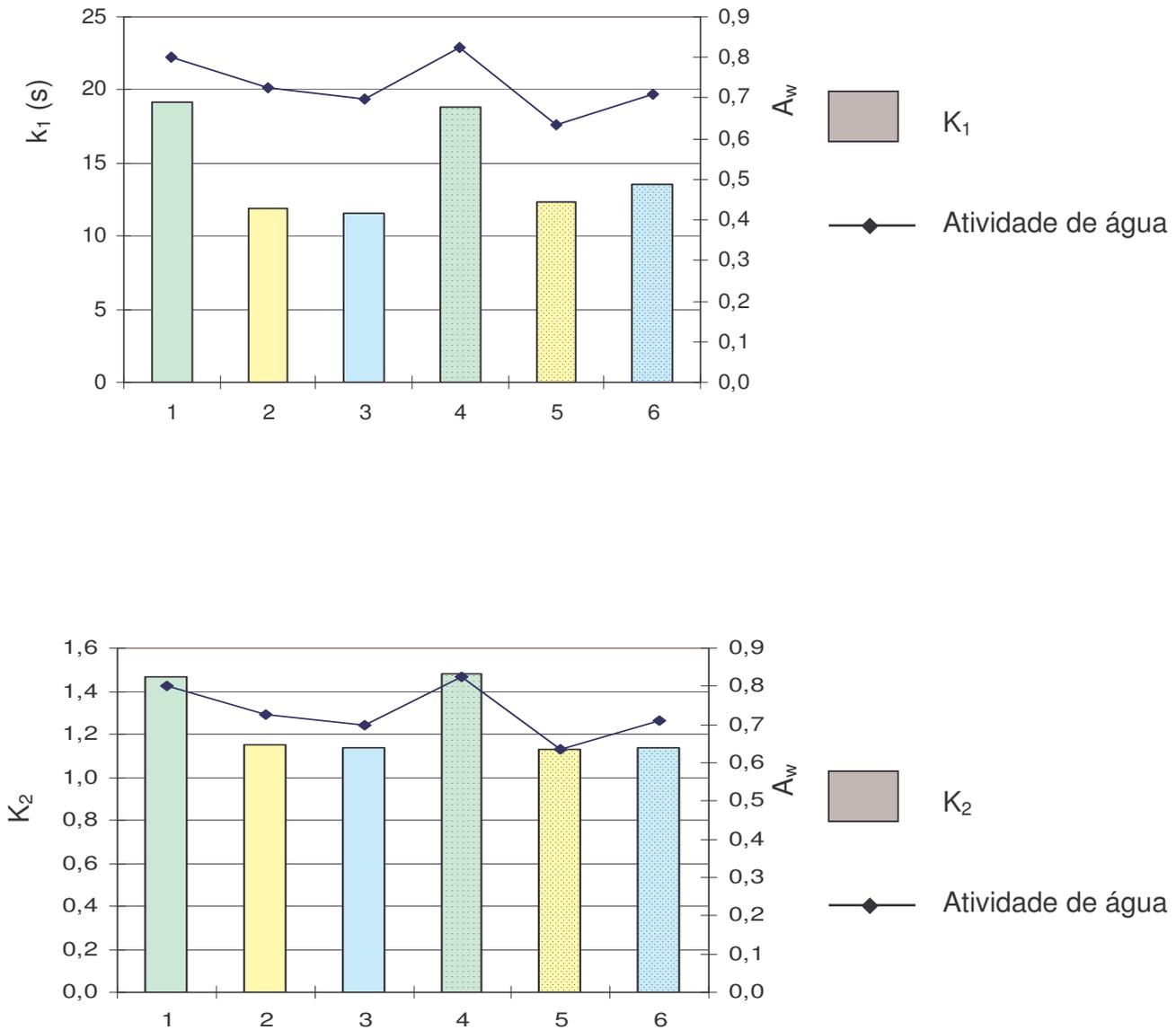
**Figura Ap. 8:** Tempos de relaxação e teor umidade (a) e atividade de água (b). Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



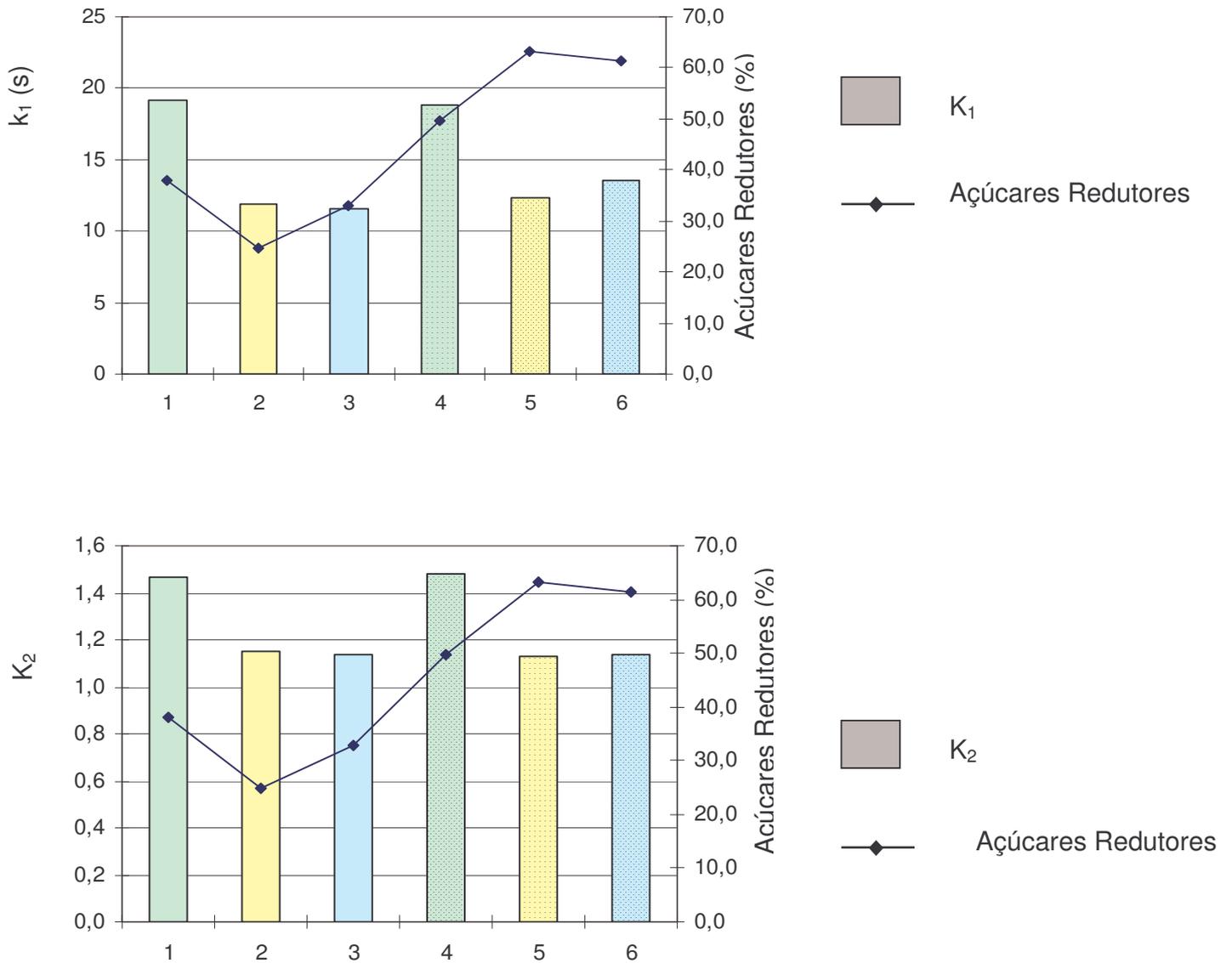
**Figura Ap. 9:** Tempo de relaxação e textura táctil (a) e textura oral (b). Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



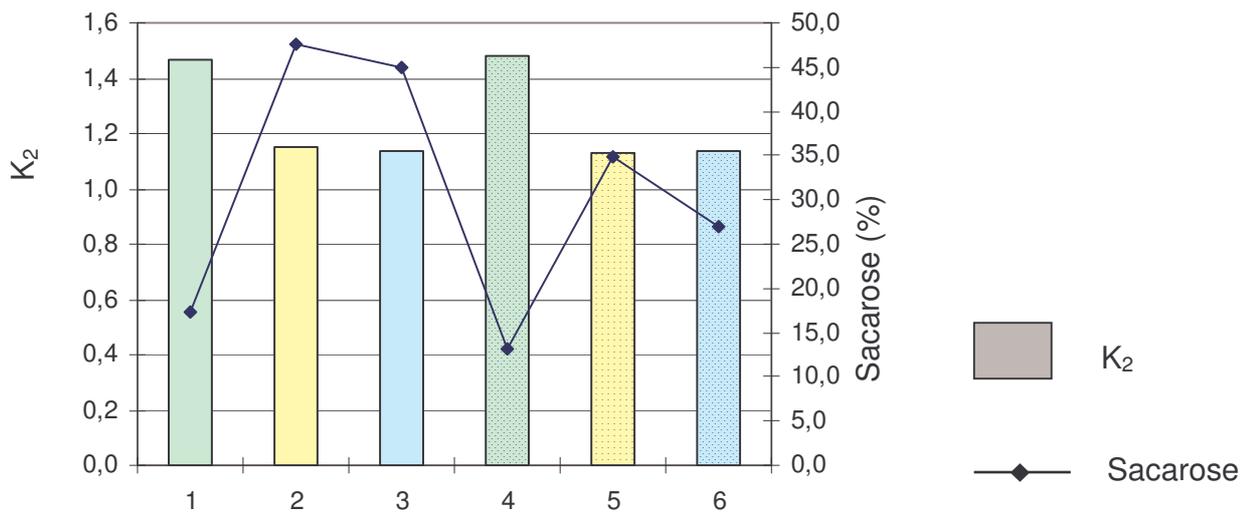
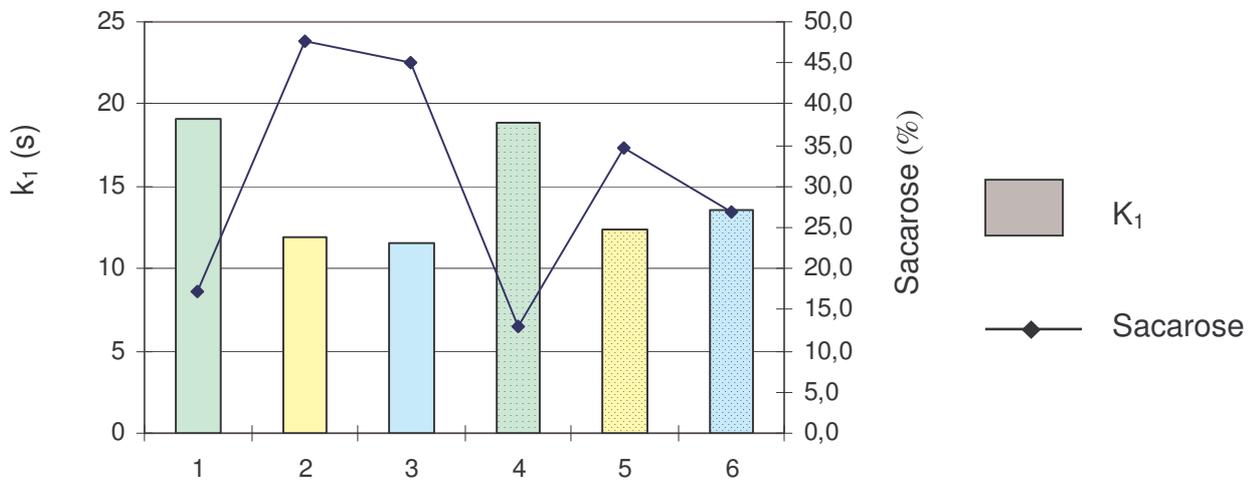
**Figura Ap. 10:** Parâmetros do modelo de Peleg & Normand,  $k_1$  (a) e  $k_2$  (b), e teor de umidade. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



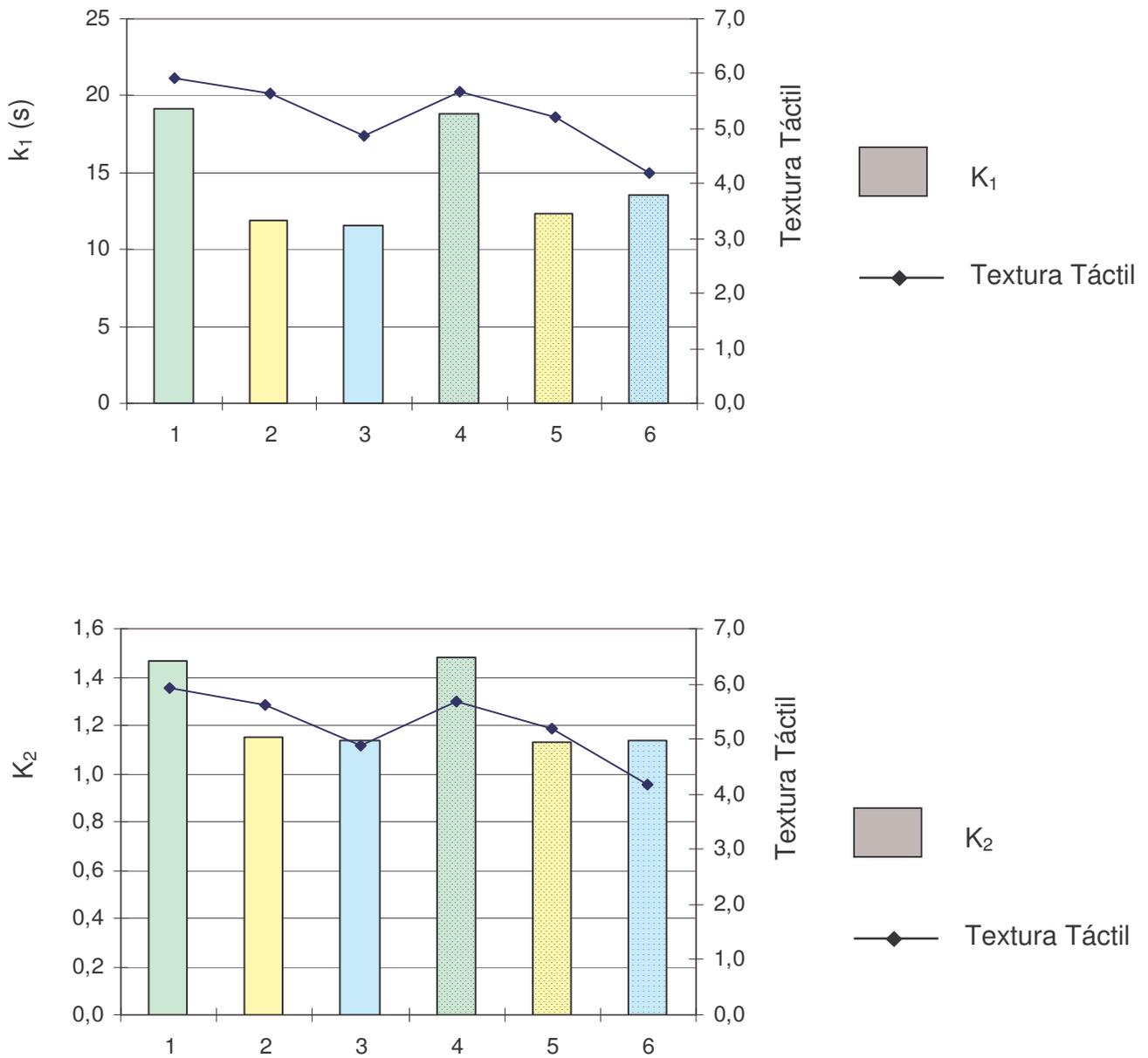
**Figura Ap. 11:** Parâmetros do modelo de Peleg & Normand,  $k_1$  (a) e  $k_2$  (b), e atividade de água. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



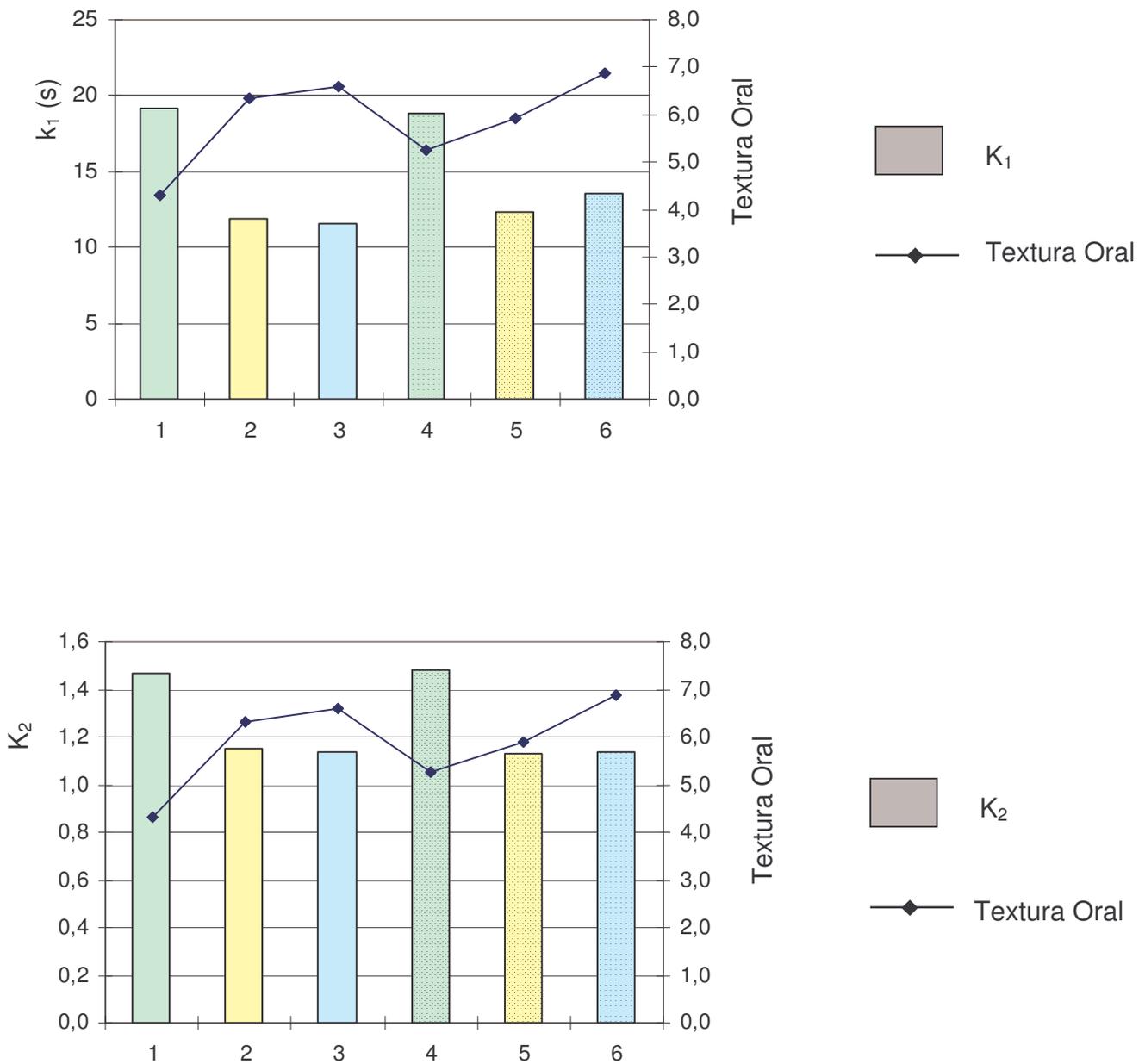
**Figura Ap. 12:** Parâmetro do modelo de Peleg & Normand  $k_1$  (a) e  $k_2$  (b) e teor de açúcares redutores. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



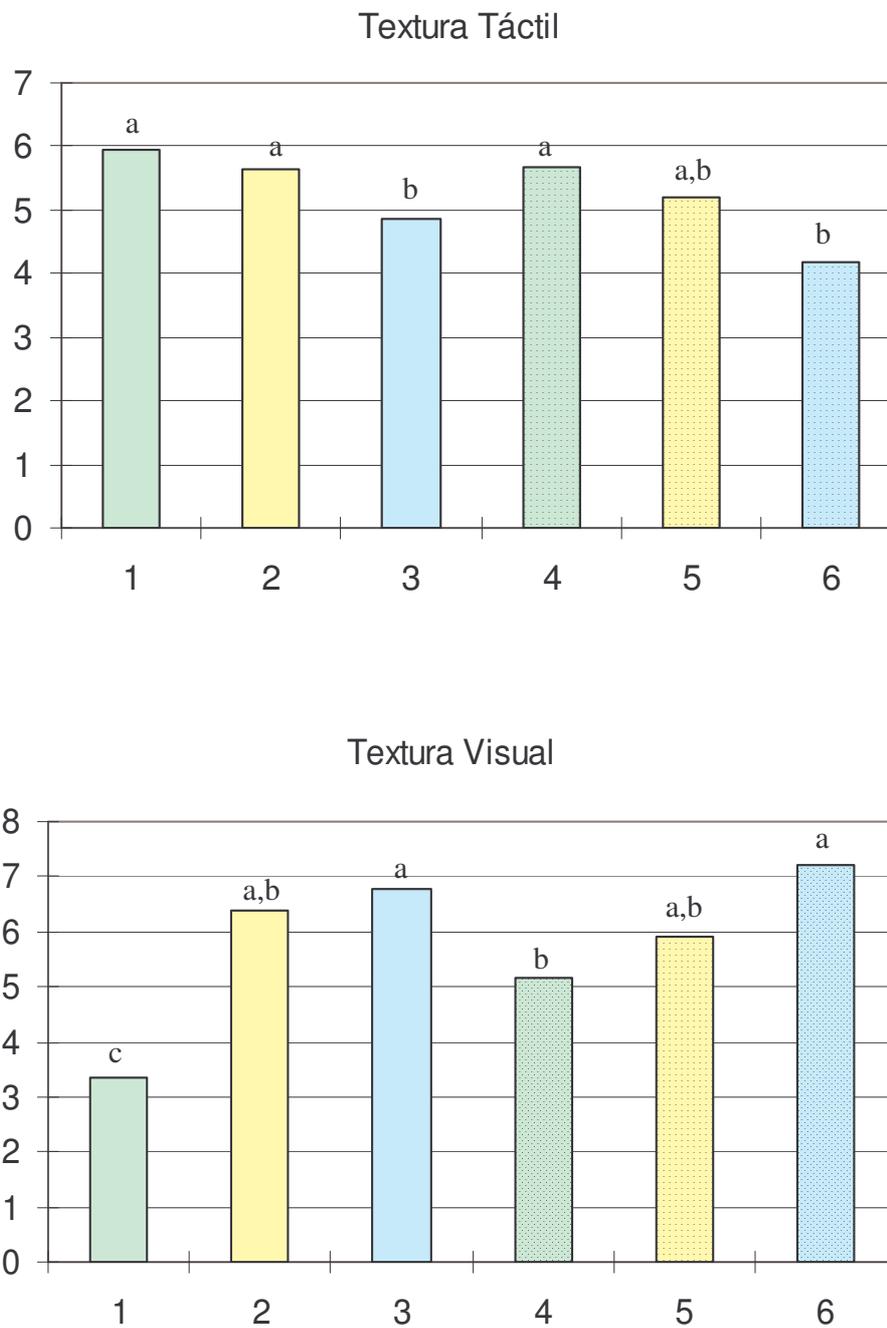
**Figura Ap. 13:** Parâmetros do modelo de Peleg & Normand  $k_1$  (a) e  $k_2$  (b) e teor de sacarose. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



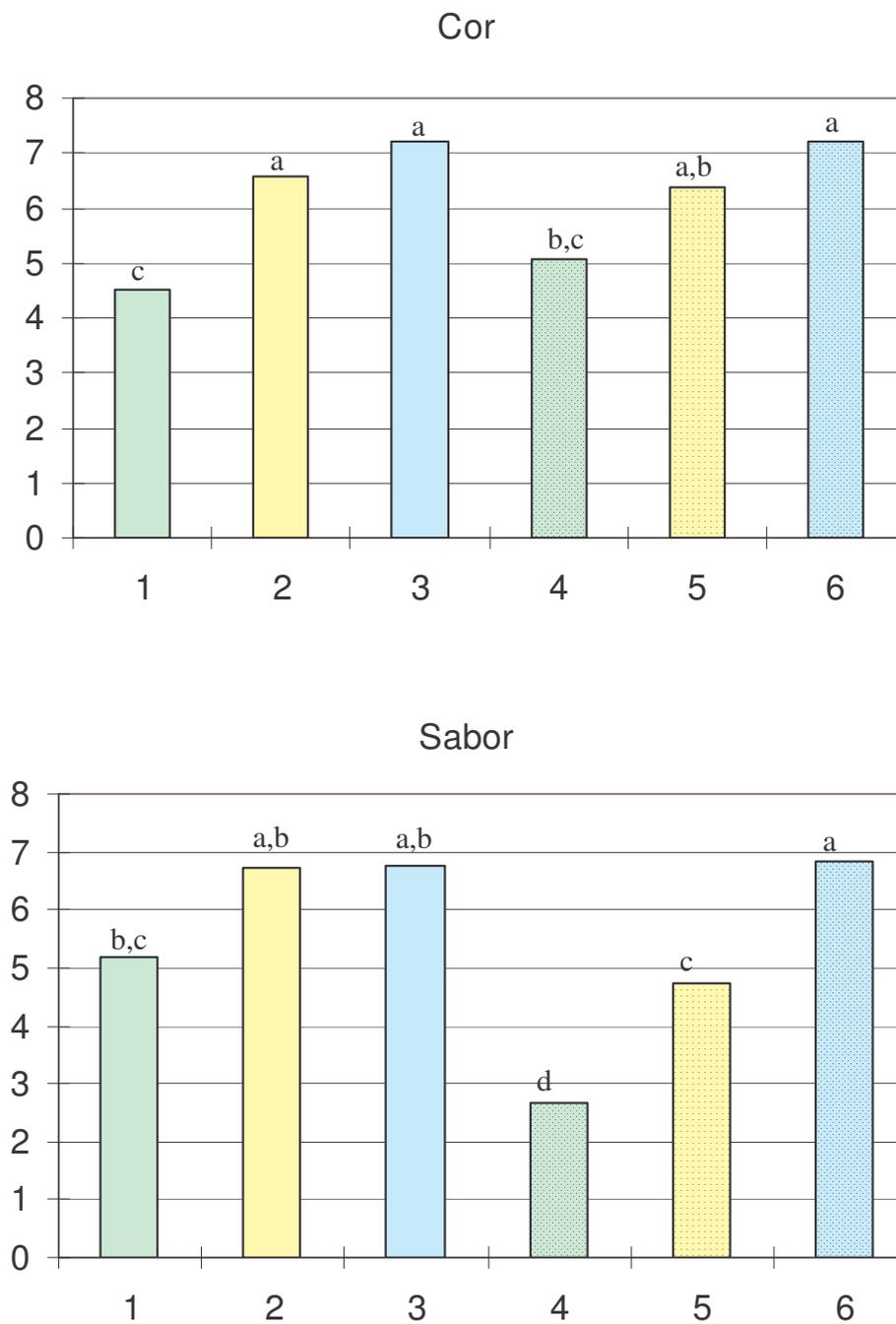
**Figura Ap. 14:** Parâmetros do modelo de Peleg & Normand  $k_1$  (a) e  $k_2$  (b) e médias das notas para textura táctil na análise sensorial. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



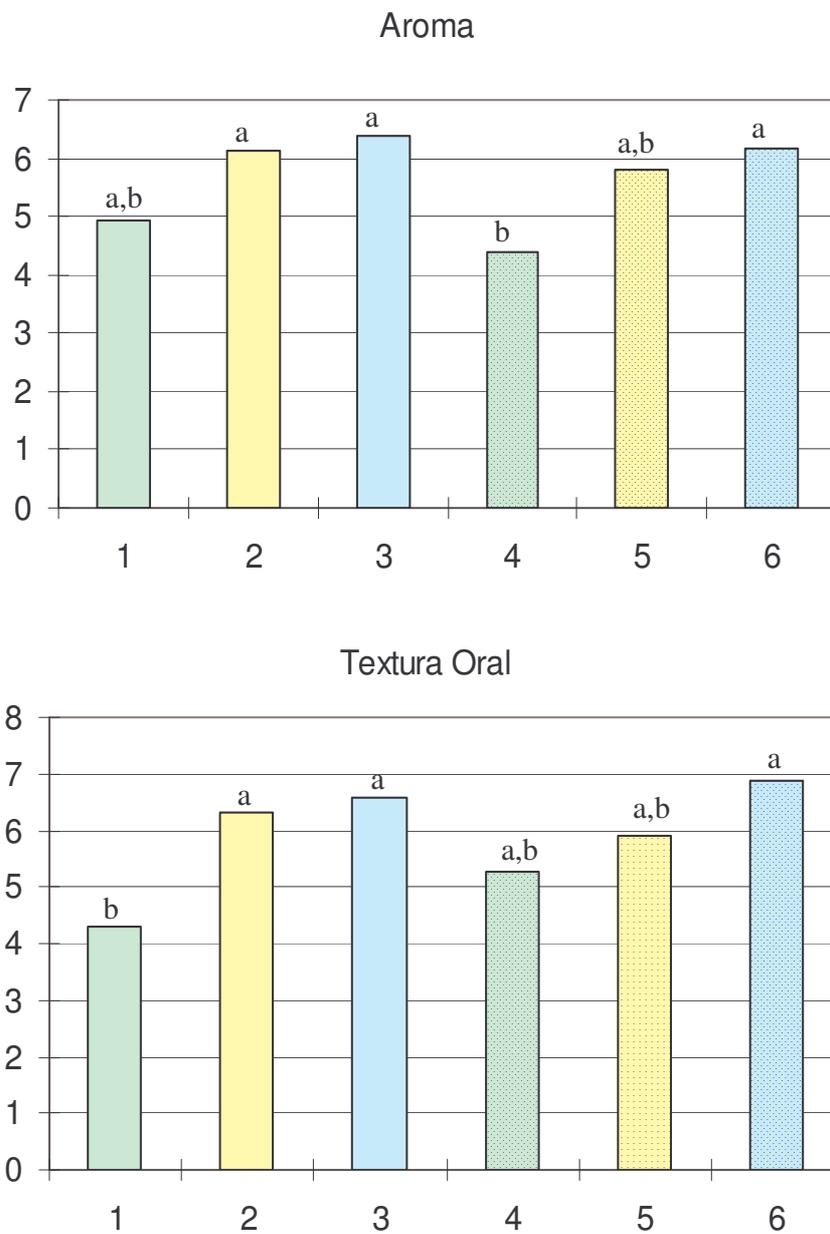
**Figura Ap. 15:** Parâmetros do modelo de Peleg & Normand  $k_1$  (a) e  $k_2$  (b) e média das notas para textura oral dadas na análise sensorial. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido



**Figura Ap. 16:** Médias das notas para os atributos textura tátil e textura visual dadas na análise sensorial. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



**Figura Ap. 17:** Médias das notas para os atributos cor e sabor dadas na análise sensorial. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.



**Figura Ap. 18:** Médias das notas para os atributos aroma e textura oral dadas na análise sensorial. Processamentos: 1: polpa de banana, 2: polpa e sacarose, 3: polpa sacarose e açúcar invertido, 4: polpa e ácido cítrico, 5: polpa, sacarose e ácido, 6: polpa, sacarose, açúcar invertido e ácido.

**ANÁLISE SENSORIAL DE BANANADA**

Nome: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

E-mail: \_\_\_\_\_ Telefone: \_\_\_\_\_

**Por favor, avalie as amostras de bananada com relação à textura táctil e marque na escala hedônica sua impressão:**

Amostra nº: \_\_\_\_\_ | \_\_\_\_\_ |  
Desgostei muitíssimo Gostei muitíssimo

Amostra nº: \_\_\_\_\_ | \_\_\_\_\_ |  
Desgostei muitíssimo Gostei muitíssimo

Amostra nº: \_\_\_\_\_ | \_\_\_\_\_ |  
Desgostei muitíssimo Gostei muitíssimo

Amostra nº: \_\_\_\_\_ | \_\_\_\_\_ |  
Desgostei muitíssimo Gostei muitíssimo

Amostra nº: \_\_\_\_\_ | \_\_\_\_\_ |  
Desgostei muitíssimo Gostei muitíssimo

Amostra nº: \_\_\_\_\_ | \_\_\_\_\_ |  
Desgostei muitíssimo Gostei muitíssimo

Comentários: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**ANÁLISE SENSORIAL DE BANANADA**

Nome: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_  
E-mail: \_\_\_\_\_ Telefone: \_\_\_\_\_

Número da amostra: \_\_\_\_\_

**Por favor, avalie as amostras de bananada com relação aos atributos indicados e marque na escala hedônica sua impressão:**

**Textura Visual:**



**Cor:**



**Aroma:**



**Sabor:**



**Textura na Boca:**



Comentários: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_