

Mariaíba C. Gibertoni Chehadi

Comportamento Reológico e
Propriedades Térmicas do Soro de Queijo



1910001347



MARIALBA C. GIBERTONI CHEHADI

Engenheira de Alimentos

COMPORTAMENTO REOLÓGICO E PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SORO DE QUEIJO



Dissertação apresentada ao
Instituto de Biociências Exatas
da Universidade Estadual
Paulista "Júlio de Mesquita
Filho", Campus de São José do
Rio Preto, para obtenção do
título de Mestre em Engenharia
e Ciência de Alimentos.

Orientador : Prof. Dr. José Antonio Gomes Vieira

São José do Rio Preto 2004
29 de Novembro de 2004

50702017
+637.344
C515c

04/03/2005

Doação

R\$ 23,00

Autor(a)

076/2005

61/05

MARIALBA C. GIBERTONI CHEHADI

Engenharia de Alimentos

COMPORTAMENTO REOLÓGICO E

PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SORO DE

QUEIJO

Chehadi, Marialba C. Gilbertoni.

Comportamento reológico e propriedades térmicas do soro de queijo /

Marialba C. Gilbertoni Chehadi – São José do Rio Preto : [s.n.], 2004

87 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: José Antonio Gomes Vieira

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Instituto de
Biociências, Letras e Ciências Exatas

1. Soro de leite. 2. Soro de queijo. 3. Soro de queijo - Propriedades
térmicas. 4. Reologia. I. Vieira, José Antonio Gomes. II. Universidade
Estadual Paulista. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. III.
Título.

CDU – 637.344



MARIALBA C. GIBERTONI CHEHADI

Engenheira de Alimentos

COMPORTAMENTO REOLÓGICO E PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SORO DE QUEIJO

COMISSÃO JULGADORA

**Tese apresentada para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia de Alimentos.**

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Gomes Vieira

2º Membro Examinador: Prof. Dr. CARLOS ALBERTO GASPARETTO

3º Membro Examinador: Prof. Dr. JAVIER TELIS ROMERO



*“Não é o desafio
que define quem somos
nem o que somos capazes de ser,
mas como enfrentamos esse desafio:
podemos incendiar as ruínas
ou construir, através dela e passo a passo,
um caminho que nos leve
à liberdade.*

Richard Bach

Dedico

Aos meus pais Cleide e Antonio que me ensinaram, o amor, o dever, a verdade, a lealdade, a honestidade, o respeito, a paciência, a luta e as qualidades de caráter. A linda família que me deram, com os irmãos Júnior, Maristela, Daniela e Juliana.

Ao meu esposo Jorge Tadeu, meu carinho especial por ter participado incondicionalmente nesta etapa de nossa vida e por acreditar e incentivar nesta oportunidade em que a vida me proporcionou.

Aos meus filhos, Vitor e Jorge, pela minha ausência, pelo afeto, e sobretudo o amor e compreensão para comigo.

A ir.: Divana Célia de Godoy, pelo incentivo e força que me conduziu a este trabalho.

E finalmente A DEUS pela sua infinita bondade em conceder-me crescimento, e por Estar sempre presente em meus caminhos. A DEUS pelo Anjinho que me colocou por pouco tempo na vida, mas que, estará para todo o sempre olhando por nossa família.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual Paulista - Campus de São José do Rio Preto, a todos os professores do curso de pós-graduação, que me proporcionaram conhecimentos e crescimento profissional.

Quero, nesta oportunidade, agradecer especialmente ao Prof. Dr. José Antonio Gomes Vieira, pela sua atenção, pelo incentivo e estímulo desde o instante em que iniciei, pela orientação nos trabalhos, experiência e principalmente nos momentos de muita dificuldade, imprescindíveis a realização deste trabalho.

Aos Professores doutores, membros da Banca Examinadora, Carlos Alberto Gasparetto, Javier Romero Telis, João Cláudio Thoméo e Patrícia Maria Onofre Colombo Silva, pela valiosa atenção dispensada, que permitiram o aprimoramento deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia e Tecnologia dos Alimentos - Crispin, Francisco, Javier, Vânia, Cida, Eliseo, Vanildo, Roger - pela amizade e solicitude com que sempre me atenderam.

À Profa. Dra. Ana Lúcia Barretto Penna, que gentilmente nos cedeu o Laboratório de Leite e Derivados, para utilização do reômetro, agilizando desta forma os experimentos.

Aos funcionários da Seção de Pós graduação, que sempre atenderam com prontidão e esmero, especialmente à Rosemar Rosa de Carvalho Brena que muita atenção dedicou a mim quando precisei.



À Daniela e Poliana, pela partilha de moradia, afeto e caloroso convívio, em meu tempo em São Jose do Rio Preto.

À Daniela, cuja convivência amiga foi importante, pelo apoio constante e companheirismo em todos os instantes que estivemos juntas. Meu muito obrigado.

As amigas Amanda e Andréia, pela amizade e carinho.

Aos amigos Alan, Angélica, Molina, Marcelo, Lucy Kelly, Elke, Raquel, Crislene, Joel, Terezinha, Fernanda e Mara, pelo apoio e amizade.

À todos, o meu muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE QUADROS.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	vii
NOMENCLATURA.....	ix
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	6
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1. SORO de QUEIJO	7



3.2. REOLOGIA	14
3.3. ESTUDOS REOLÓGICOS	17
3.3.1. Fluidos Newtonianos.....	17
3.3.2. Fluidos Não-Newtoniano.....	17
3.3.3. Classificação Geral do Comportamento	
Reológico.....	18
3.4.MODELOS REOLÓGICOS.....	20
3.4.1. Modelo de Oswald-de-Souza (Lei da Potência).....	23
3.4.2. Modelo de Casson	24
3.4.3. Modelo de Herschel-Bulkey.....	25
3.4.4. Modelo de Mizrahi-Berck	26
3.4.5. Modelo de Bingham	28
3.5. PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE ALIMENTOS FUIDOS.....	29
3.6. EFEITO DA COMPOSIÇÃO E TEMPERATURA	
 SOBRE OS PARÂMETROS REOLÓGICOS.....	30



3.7. PROPRIEDADES TÉRMICAS	32
3.7.1. Condutividade Térmica.....	35
3.7.2. Calor Específico.....	35
3.7.3. Difusividade Térmica.....	40
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	42
4.1. MATÉRIA-PRIMA.....	45
4.2. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA.....	45
4.3. DETERMINAÇÃO DOS DADOS REOLÓGICOS.....	47
4.3.1. Equipamentos.....	47
4.3.2. Análise do Comportamento Reológico	47
4.4. PROPRIEDADES TÉRMICAS.....	51
4.4.1. Condutividade Térmica.....	52
4.4.2. Calor Específico.....	52
4.4.3. Difusividade Térmica.....	55
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57



5.1. CARACTERIZAÇÃO DO SORO.....	57
5.2. COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO SORO	58
5.3. PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SORO.....	71
6. CONCLUSÕES PARCIAIS.....	76
7. SUGESTÕES.....	77
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78



LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Composição do soro	8
Quadro 2	Principais componentes da proteína de soro, características nutricionais e atividade biológica relatada	9
Quadro 3	Composição do soro utilizado no presente trabalho em porcentagem	57



LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Curvas de escoamento para vários tipos de fluidos independentes do tempo	21
Figura 2	Curvas de escoamento para fluidos com comportamento dependente do tempo	22
Figura 3	Fluxograma da obtenção do soro	46
Figura 4	Reômetro utilizado no estudo do comportamento Reológico do soro	49
Figura 5	Reômetro utilizado, sistema de placas, cone Spindle CPE-40	50
Figura 6	Diagrama esquemático da montagem experimental para medir a condutividade elétrica	53
Figura 7	Esquema do calorímetro	55
Figura 8	Montagem experimental para medir a difusividade térmica	56



Figura 9	Relação entre Tensão de Cisalhamento e Taxa de Deformação para o soro com concentração a 6°Brix com temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C, curva ascendente	60
Figura 10	Relação entre Tensão de Cisalhamento e Taxa de Deformação para o soro com concentração à 6°Brix com temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C, curva descendente	60
Figura 11	Relação entre Tensão de Cisalhamento e Taxa de Deformação para o soro com concentração à 12°Brix com temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C, curva ascendente	62
Figura 12	Relação entre Tensão de Cisalhamento e Taxa de Deformação para o soro com concentração à 12°Brix com temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C, curva descendente	65
Figura 13	Relação entre Tensão de Cisalhamento e Taxa de Deformação para o soro com concentração à 18°Brix com temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C, curva ascendente	66
Figura 14	Relação entre Tensão de Cisalhamento e Taxa de Deformação para o soro com concentração à 18°Brix com temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C, curva descende	68



- Figura 15** Relação entre Tensão de Cisalhamento e Taxa de Deformação para o soro com concentração à 24rix com temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C, curva ascendente 69
- Figura 16** Relação entre Tensão de Cisalhamento e Taxa de Deformação para o soro com concentração à 24°Brix com temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C, curva descendente 70
- Figura 17** Condutividade Térmica do Soro de Queijo em Função Do Teor de Água. O símbolo corresponde aos dados experimentais e a linha a valores usando a Equação 13 72
- Figura 18** Difusividade Térmica do Soro de Queijo em Função do Teor de Água. O símbolo corresponde aos dados experimentais e a linha a valores usando a Equação 15 74
- Figura 19** Calor Específico do Soro de Queijo em Função do Teor de Água. O símbolo corresponde aos dados experimentais e a linha a valores usando a Equação 16 75



LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Parâmetros do modelo de Bingham para o soro à 6°Brix	60
Tabela 2	Parâmetros do modelo de Bingham para o soro à 6°Brix	62
Tabela 3	Parâmetros do modelo de Bingham para o soro à 12°Brix	65
Tabela 4	Parâmetros do modelo de Bingham para o soro à 12°Brix	66
Tabela 5	Parâmetros do modelo de Bingham para o soro à 18°Brix	67
Tabela 6	Parâmetros do modelo de Bingham para o soro à 18°Brix	68
Tabela 7	Parâmetros do modelo de Bingham para o soro à 24°Brix	69



Tabela 8 Parâmetros do modelo de Bingham para

o soro à 24°Brix

70

x

NOMENCLATURA

A	- Taxa constante de elevação de temperatura em todos os pontos do cilindro.....	(°C/s)
b.u	- Base úmida.....	%
C	- Capacidade calorífica do calorímetro.....	cal/°C
c_a	- Calor específico da água.....	cal/g°C
c_m	- Calor específico do material	cal/g°C
K	- Índice de consistência.....	(Pa.s ⁿ)
K	- Condutividade térmica.....	W/k
K_c	- Viscosidade plástica de Casson.....	(Pa.s ⁿ)
K_{OM}	- Raiz quadrada da tensão inicial	(Pa) ^{1/2}
m_a	- Massa da água	G
m_m	- Massa do material	G
n	- Índice de comportamento (adimensional)	
Q	- Potência por unidade de comprimento dissipada pelo fio aquecedor.....	W/w
T	- Temperatura.....	°C



T_a	- Temperatura da água.....	°C
T_m	- Temperatura do material.....	°C
T_e	- Temperatura de equilíbrio.....	°C
τ	- Tensão de Cisalhamento.....	(Pa)
γ	- Taxa de Deformação.....	(1/s)
τ_0	- Tensão inicial.....	(Pa)
η_p	- Viscosidade plástica de Bingham.....	(Pa.s)
η	- Viscosidade absoluta.....	(Pa.s)
μa	- Viscosidade aparente.....	(Pa.s)
α	- Difusividade térmica	(m ² /s).



RESUMO

Com a crescente produção de queijos nos últimos anos, faz-se necessário criar alternativas para o aproveitamento do soro, visto que, o seu tratamento é extremamente caro e desnecessário. Sendo que, o soro de queijo é rico em proteínas, lactose e sais minerais, podendo ser empregado diretamente ou ter seus componentes utilizados em varias formulações de alimentos. O seu aproveitamento requer o conhecimento das propriedades ligadas aos padrões de escoamento e de transferência de calor, com vista à aplicação dos processos e das instalações industriais. O objetivo desse trabalho é estudar o comportamento reológico do soro de queijo nas temperaturas de 10 a 60°C e nas concentrações de 6, 12, 18 e 24°Brix e determinar experimentalmente a condutividade térmica, calor específico e difusividade térmica a 25°C numa faixa de 50 a 93% de teor de água (base úmida). O reômetro utilizado para o estudo foi o de placas paralelas marca BROOKFIELD modelo RDV-III. As diferentes concentrações foram obtidas concentrando o soro em um roto-evaporador a 45°C e 25 in de Hg de vácuo. Os reogramas foram descritos pelos modelos de Ostwald-de-Waele, Casson e de Bingham na faixa de taxa de deformação 75-1850 s⁻¹. Pelos resultados obtidos o modelo que melhor representa os dados experimentais é o de Bingham, embora os outros dois também pode ser



aplicados. O índice de consistência, a tensão inicial e a viscosidade plástica de Bingham aumentam com o aumento da concentração do soro. Os valores das três propriedades térmicas aumentam com o aumento do teor de água, segundo uma relação linear. Os resultados obtidos foram usados para obter modelos matemáticos para estimar essas propriedades em função do teor de água.

Palavras-chaves: soro de queijo, propriedades térmicas, reologia.



ABSTRACT

With the growing production of cheese in the last years, it is necessary to create alternatives for the use of the whey, because, its treatment is extremely expensive and necessary. And, the cheese whey is rich in proteins, lactose and mineral salts, it could be used directly or to have its components used in vary formulations of foods. Its use requests the knowledge of the linked properties to the drainage patterns and of transfer of heat, with view to the application of the processes and of the industrial facilities. The objective of that work is to study the behavior reological of the cheese whey in the temperatures from 10 to 60°C and in the concentrations of 6, 12, 18 and 24°Brix and to determine the thermal conductivity, specific heat and thermal difusivity experimentally to 25°C in a strip from 50 to 93% of tenor of water (humid base). The reômetro used for the study it was it of parallel plates it marks ROOKFIELD model RDV-III. The different concentrations were pondering the whey in a break-evaporador to 45°C and 25 in of Hg of vacuous. The reogramas were described by the models of Ostwald-of-Waelle, Casson and of Bingham in the strip of rate of deformation 75-1850 s⁻¹. For the obtained results the model that best represents the experimental data it is it of Bingham, although the other ones two can also be applied. The consistence index, the initial tension and the plastic viscosity of Bingham increase with the



increase of the concentration of the serum. The values of the three thermal properties increase with the increase of the tenor of water, second a lineal relationship. The obtained results were used to descrive mathematical models to esteem those properties in function of the tenor of water.

Key words: whey, thermal properties e rheological.



1- INTRODUÇÃO

No Brasil, segundo estimativa da Associação Brasileira dos Produtores de Leite – ABPL (2001), o consumo de queijos foi recorde nestes últimos cinco anos, em torno de 341,7 mil toneladas, e continua em ascensão. Conseqüentemente, com este crescimento aumentou a necessidade de se criar alternativas para a utilização do soro principalmente pelos pequenos e médios laticínios, visto que o tratamento de efluentes é extremamente caro e dispendioso e, sendo o soro rico em diversos nutrientes, pode ser empregado diretamente ou ter seus componentes utilizados em várias formulações de alimentos. A adição do soro em formulações e produtos vem ganhando um mercado emergente, principalmente com o maior nível de informação sobre benefícios nutricionais, menor custo do produto para o fabricante e redução do preço final para o consumidor.

Soro de queijo é uma mistura de proteína, lactose, sais minerais e uma pequena parte de gordura do leite. Todos estes componentes podem ser alterados conforme os requisitos específicos dos produtos em que será utilizado. Nenhum outro ingrediente apresenta esta flexibilidade, e isto explica a razão pela qual os derivados de soro atualmente são considerados ingredientes principais de tantos produtos alimentícios, e



aparecem no rótulo de tantos outros. Os três tipos de soro de queijo mais utilizados são: o soro doce, os concentrados protéicos de soro e o soro desmineralizado.

O soro láctico é um líquido amarelo esverdeado, ligeiramente ácido, e representa 80 a 84% do volume do leite utilizado na preparação de queijo. O soro é rico em nutrientes como proteínas de alto valor biológico, lactose, gordura e sais minerais. Contém ainda quantidades consideráveis de outros componentes como o ácido láctico, ácido cítrico, compostos nitrogenados não protéicos e vitaminas do grupo B. A lactose e proteínas solúveis são os componentes mais importantes do ponto de vista nutricional, tecnológico e ambiental (VEISSEYRE, 1980).

Para cada quilo de queijo são produzidos aproximadamente, 9 litros de soro: considerando que a produção de queijos no Brasil está em torno de 450 mil toneladas/ano isto corresponde a 4.050.000 toneladas de soro de queijo: sendo a sua composição: 6,9% de sólidos totais, 0,6% de sais minerais, 0,3% de gordura; 0,9% de proteínas: 5% de lactose, 0,1% de ácido láctico resultante da fermentação da lactose, este volume equivale a 24.300 toneladas de sais minerais, 36.450 toneladas de proteínas, 12.150 toneladas de gordura e 202.500 toneladas de lactose (SANTOS; FERREIRA, 2001).



Acredita-se que aproximadamente 50% de todo o soro produzido não é aproveitado, sendo este número maior quando consideremos apenas as pequenas e médias indústrias. Descartar este soro sem um prévio tratamento não é só crime previsto pôr lei, é jogar alimento da mais alta qualidade e dinheiro fora.

No Brasil, durante muito tempo, o soro foi usado na alimentação animal ou despejado no meio ambiente, provocando desastres ecológicos enormes. Em países da Europa e nos EUA, o soro é largamente utilizado como ingrediente ou como produto primário, sendo empregado, na fabricação de bebidas lácteas, molhos para saladas, panificação, sopas, sorvetes, aplicações nutricionais (fórmulas infantis), produtos de carne (presunto, embutidos), entre outros produtos (USDEC, 1997).

Existem diversos processos que visam o aproveitamento do soro, para ser utilizado como ingrediente importante em diversas formulações como, bebidas lácteas, leites fermentados, mistura em sucos, além de outros produtos como ricota que pode ser obtida pelo seu processamento.

Além de tornar os produtos mais nutritivos ele confere aspectos físicos necessários, como: aumento da viscosidade desenvolvendo uma textura lisa e cremosa desejada, evita a separação e a sinerese que ocorrem durante a estocagem e a distribuição e não altera o sabor.



No entanto, na engenharia o processamento do soro exige uma série de conhecimentos a respeito das características do produto, com vistas à aplicação dos processos e das instalações industriais às suas exigências específicas. Isso implica na necessidade de se ter dados a respeito das propriedades ligadas ao comportamento reológico e de transferência de calor desse fluido, com importância na otimização, no controle e nos cálculos de processo importante na manipulação e industrialização do produto.

Na aplicação de vários processos faz-se necessário o conhecimento das propriedades físicas, ponto chave nos projetos de equipamentos e/ou processos de transporte, bombeamento, concentração, pasteurização, evaporação, resfriamento e armazenamento. Essas operações unitárias têm um papel fundamental para as indústrias de laticínios. Muitos dos problemas encontrados podem ser analisados através dos princípios de transferência de calor. O uso das equações básicas de transferência de calor necessita de um conhecimento das propriedades térmicas do produto envolvido. A maior limitação nos estudos dessas operações é a falta de dados em relação às propriedades físicas. Na estimativa da quantidade de energia requerida para a mudança de temperatura de um produto, o calor específico e o calor latente são as únicas propriedades térmicas necessárias. Contudo, um engenheiro deve também conhecer a taxa de transferência de calor



para projetar processos e equipamentos mais eficientes, a difusividade ou a condutividade térmica também são necessárias.



2- OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivos:

- Estudar o comportamento reológico do soro de queijo em função do teor de sólidos solúveis e da temperatura;
- Determinar experimentalmente as propriedades, condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico do soro em função do teor de água.



3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – SORO DE QUEIJO

O soro é um resíduo da produção de queijo, obtido através da fermentação do leite por ação bacteriana, acidificação direta ou por ação de enzimas coagulantes. Segundo Marchini (1998), a acidez titulável é similar a do leite, oscilando em valores em torno de 12º Dornic. Os valores de pH também indicam semelhança com ao do leite, em média 6,6. A composição do soro de leite é de aproximadamente 6.9% de sólidos totais que correspondem a 0.6% de sais minerais, 0.3% de gordura, 0.9% de proteína, 5% lactose e 0.1% de ácido láctico proveniente da fermentação da lactose.

A natureza do soro depende do tipo de queijo que lhe dá origem. Basicamente há dois tipos de soro láctico: doce obtido, pelo uso de enzimas, e ácido, obtido através da acidificação do leite pela ação das culturas ou adição de ácido láctico (CAL-VIDAL, 1979), apresentados no quadro 01.



Quadro 1. Composição do soro.

Componente	Soro doce líquido %	Soro ácido líquido%
Proteína	0,8	0,8
Lactose	4,7	4,3
Cinzas	0,5	0,6
Gordura	0,6	0,3
Ácido láctico	0,2	0,5
Água	93,5	93,5

Fonte: CAL-VIDAL, 1979

Quadro 2. Principais componentes da proteína de soro, características nutricionais e atividade biológica relatada. (USDEC, 2003)

Componente da Proteína	% da Proteína de Soro Total	Características Nutricionais e Atividade Biológica Relatada
Beta-lactoglobulina	50% a 55%	- Estimula a ligação de vitaminas lipossolúveis, aumentando sua biodisponibilidade; - Constitui uma excelente fonte de aminoácidos essenciais e de cadeia ramificada (BCAA), os quais ajudam a prevenir degradação muscular;
Alfa-lactalbumina	20% a 25%	- Principal proteína do soro encontrada no leite humano - Componente da proteína de soro preferida para soro uso em fórmulas infantis
		- Contém níveis mais elevadas de triptofano (substância associada à modulação de estresse); - Fornecer todos os aminoácidos essenciais e aminoácidos de cadeia ramificada (BCAA); - Possui atividade potencial contra o câncer
Imunoglobinas	10% a 15%	Potencializa e fortalece o sistema imunológico e aumenta a proteção do organismo contra doenças
Albumina Sérica Bovina	5% a 10%	Fornecer aminoácidos essenciais
Glicomacropéptidos (GMP)	2% a 5% aminoácidos	- Contém quantidades elevadas de aminoácidos de cadeia ramificada (BCAA), mas apenas quantidade traço de aminoácidos aromáticos; - Propicia efeito imunomodulador e um sistema de defesa passiva a recém-nascidos - Possui atividade antibacteriana e inibe a produção de toxinas por microrganismos; - Estimula o organismo a produzir colecistoquinina, o hormônio liberado após a ingestão de alimentos e que é responsável pela sensação de saciedade; - Fonte desejável de proteínas para indivíduos com fenilcetonúria pela falta de fenilalanina.
Lactoferrina	1% a 2%	- Possui atividade antibacteriana e inibe a produção de toxinas por microrganismos - Promove o crescimento de bactérias benéficas, tais como Bifidus; - Regula a absorção e a biodisponibilidade de ferro - Propicia efeito imunomodulador, juntamente com atividade contra vírus, câncer e trombose.

Os componentes do soro podem ser alterados conforme os requisitos específicos dos produtos em que será utilizado. Nenhum outro ingrediente apresenta esta flexibilidade, e isto explica a razão pela qual os derivados de soro atualmente são considerados ingredientes principais de tantos produtos alimentícios, e aparecem no rótulo de tantos outros. Usado em produtos lácteos como sorvetes, iogurtes, queijos, bebidas e achocolatados, produtos de panificação, de confeitaria, “snacks”, salgadinhos, preparados, aromatizados para café e outros alimentos industrializados e produtos nutricionais como: fonte econômica de sólidos lácteos; substituto parcial de leite em pó desnatado incorpora no produto final concentrações similares de lactose, de proteínas e minerais/cinzas e proteína solúvel em soluções ácidas (UDESC, 1997).

Um ingrediente nutritivo deve fornecer elementos essenciais e ser de alta qualidade (MARCHINI, 1998). As proteínas do soro possuem um dos mais altos índices de valor biológico em comparação a outras fontes de proteínas, tais como ovos, carne bovina, soja e caseína. É um conjunto heterogêneo de proteínas que representam aproximadamente 20% do total de proteína Láctea (RICHARDS, 2002).



Essa proteína contém aminoácidos essenciais, são facilmente digeridos – de fato muito mais que qualquer outra proteína, e são também ricos em vitaminas tais como tiamina, riboflavina, ácido pantotênico e vitaminas B6 e B12. As proteínas do soro de leite, por sua vez, servem como veículo para o cálcio, sendo que a interação proteína-mineral potencializa a biodisponibilidade não somente do cálcio, mas também do fósforo. Além disso, a combinação cálcio proteína aumenta a solubilidade do cálcio, facilitando a manutenção deste mineral em solução. Isso é muito vantajoso, pois os produtos terão um complexo de minerais que atuará de forma benéfica no organismo. Ou seja, fornecendo não só o cálcio, mais demais minerais e proteínas do soro de leite (USDEC 2003).

O soro contém as proteínas mais completas que se conhece na natureza, sendo as principais; Lactoglobulina, α -Lactoalbumina, Lactoferrina., Proteose-peptona, Lactoperoxina e outras. São proteínas com excelentes valores biológico, destacando-se aminoácidos importantes como: triptofano, ácido aspártico, alanina, treonina e lisina (VEISSEYRE,1980).

Estudos recentes sugerem que as proteínas do soro possuem propriedades anticarcinogênicas (BOUNOUS *et al.* 1991), e capacidade imuno-estimulante (KENNEDY *et al.* 1995). Uma possível causa relacionada a estas propriedades é a composição em aminoácidos sulfurados (cisteína e metionina). Aminoácidos sulfurados são



necessários para a síntese de glutathione, um tripeptídeo (L-gg-glutamyl-L-cisteína-glicina) contendo um grupo sulfidrílico. Sua maior concentração ocorre no fígado, que regula o fluxo ao plasma sanguíneo e a bile. O fígado é o órgão principal envolvido na desintoxicação e eliminação de genobióticos, enquanto a mucosa gastrointestinal (onde a bile age durante o processo digestivo) é exposta a substâncias exógenas com potencial mutagênico e carcinogênico. Desta forma os aminoácidos sulfurados agem como agentes de prevenção, interferindo no desenvolvimento de tumores de cólon (PARODI, 1998).

Nas áreas de terapia nutricional, de pessoas com o sistema imunológico comprometido, para melhorar ou aperfeiçoar o desempenho físico, a proteína de soro já comprovou sua importância e valor. A experiência em outras áreas como tratamento de hipertensão, redução de colesterol, prevenção e regressão de câncer deve alertar os profissionais para a importância de se acompanhar atentamente a literatura científica sobre o crescente uso de proteína de soro em aplicações novas ou já em fase de desenvolvimento.

O soro é, na maior parte, descartado pela indústria de laticínios, apesar de ser riquíssimo em proteínas e lactose. A produção de queijo nas indústrias de laticínios resulta em uma grande produção de soro, pois para cada Kg de queijo resulta em 9 litros de soro. Durante muito tempo este soro foi usado na alimentação animal ou despejado no meio



ambiente provocando desastres ecológicos enormes, devido ao seu alto valor de demanda bioquímica. Devido ao alto grau de lactose, 1 litro de soro de leite apresenta 50g O₂, o que é considerado muito alto uma vez que uma pessoa, em 24 horas, gera 30g O₂ (RALPH, 1982).

Cada vez mais a legislação envolvendo o meio ambiente cobra das indústrias de laticínios um tratamento ou reaproveitamento para o soro produzido pelas mesmas.

Existem diversos métodos que auxiliam no aproveitamento do soro, mas nem todos são aplicados em todas as indústrias. Alguns destes são: o emprego na alimentação de animais, secagem, transporte para outras indústrias, produção de combustível pela fermentação anaeróbica, separação de seus componentes e aproveitamento direto em formulações (bebida lácteas, misturas em sucos etc.), além de outros produtos como ricota que pode ser obtida pelo seu processamento.



3.2- REOLOGIA

Reologia é a ciência que estuda as propriedades mecânicas dos materiais quando solicitados pôr forças externas.

Na ciência dos alimentos, a reologia é usada para o estudo da estrutura como resposta à aplicação de força ou deformação (SHOEMAKER *et al.*, 1992).

É importante conhecer as propriedades reológicas dos alimentos, porque são essenciais para:

- a) Efetuar o controle de matérias-primas, de processos de fabricação e de produtos finais;
- b) Estudar a influência de componentes de formulação e relacionar a estrutura dos produtos com as suas características reológicas (aplicações em engenharia);
- c) Correlacionar os dados reológicos com as avaliações organolépticas

Estas propriedades são importantes para o projeto, cálculo, escolha de operações de manuseio dos materiais, do processamento e de equipamentos usados na indústria, como também na classificação de certas propriedades como, viscosidade e textura, pois estas determinam a consistência do produto e influenciam na aceitabilidade pelos



consumidores (AWADHWAL & SINGH, 1985; CAMPOS, 1989; MARCOTTE, HOSHAHILI & RAMASWAMY, 2001).

Como em qualquer outro alimento, as propriedades reológicas de derivados do leite também são determinadas pela sua composição e estrutura e pelo tipo de solicitação mecânica que são submetidos. Muitas mudanças que ocorrem nas propriedades dos derivados do leite em diferentes condições ambientais devem ainda ser explicadas. Certos derivados do leite, quando submetidos à deformação, exibem um amolecimento, aparecimento devido à quebra de sua estrutura. Contudo a sua estrutura pode se refazer com o tempo e exibir um comportamento tixotrópico, característico de muitos produtos (AWADHWAL & SINGH, 1985).

Segundo Benezech & Maingonnat (1994), diferentes fatores tecnológicos influem nas propriedades reológicas de iogurtes: a preparação e tratamento térmico do leite, a incubação, o processo usado no resfriamento, durante o bombeamento e transporte e nas operações de acondicionamento.

Para correlacionar os parâmetros de escoamento com as características físico-químicas dos componentes de um produto, a abordagem empírica tem sido preferida devido à disponibilidade de metodologia prática que permite apenas o estabelecimento de modelos de comportamento reológico que são mais úteis para aplicações do



cálculo de equipamentos e processo. Os dados de escoamento são coletados de amostras preparadas variando-se uma propriedade de cada vez e uma equação empírica é derivada através de técnicas de ajuste de curvas.

A essência desta metodologia está na otimização de números de variáveis, se há muitas, o experimento pode se tornar muito complicado, se poucas, a equação resultante pode ser inadequada (AMSTALDEN, 1996).

As condições de ensaio dependem da informação desejada. Se o objetivo é avaliar a consistência de um produto alimentício recém-processado (semi-sólido), as taxas de deformação (ou tensões de cisalhamento) aplicadas devem ser suficientemente baixas para assegurar um mínimo de alterações na estrutura do produto. Por outro lado, se o interesse é avaliar a movimentação do produto sobre uma superfície sólida, as condições de ensaio devem ser mais severas a fim de causar alterações apreciáveis na estrutura do produto. No último caso, a dificuldade maior é saber quais as condições a que o produto está sendo submetido na prática. Então, a correlação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação tem que ser estudada de maneira abrangente e para valores elevados das duas variáveis. A escolha do método deve ser racional, ou seja, obter a informação desejada com uma quantidade mínima de experimentos.



3.3- ESTUDOS REOLÓGICOS

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

3.3.1- Fluidos Newtonianos

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

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



A equação matemática que descreve seu comportamento é dada pôr:

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

onde:

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

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

η = Viscosidade absoluta (Pa s)

3.3.2- Fluidos Não-Newtonianos

Todos os fluidos que não exibem o comportamento descrito pela Eq.(1) são chamados não-newtonianos e podem apresentar comportamento independente ou dependente do tempo, (HOLDSWORTH, 1971; RAO, 1986).

Para os fluidos não-newtonianos independentes do tempo, à temperatura e composição constante, a viscosidade aparente depende somente da taxa de deformação ou da tensão de cisalhamento. Nestes fluidos, o termo viscosidade perde seu sentido, a menos que seja especificada a tensão de cisalhamento ou gradiente de velocidade. Por



isso, costuma-se utilizar o termo viscosidade aparente (RAO & RIZVI, 1986).

Os fluídos cuja viscosidade não varia com o tempo são os plásticos de Bingham, os pseudoplásticos e os dilatantes (CAMPOS, 1989).

Alguns alimentos apresentam propriedades viscosas e elásticas conjugadamente (CAMPOS, 1989). Os alimentos que não são sólidos ou líquidos, porém possuem as duas propriedades podem ser considerados viscoelásticos (SHOEMAKER *et. al.*, 1992). Quando a tensão de cisalhamento cessa, ocorre uma certa recuperação da deformação. Tal comportamento é descrito por alimentos como: sorvete de massa e creme de leite, iogurte e ainda farinhas de trigo, gelatinas e queijos (VITALI, 1983).

Muitos fatores podem afetar as propriedades de fluxo do alimento, tais como efeitos químicos (composição do alimento), efeitos físico-químicos e físicos (temperatura).



3.3.3- Classificação Geral do Comportamento Reológico

- Fluidos pseudoplásticos
- Fluidos dilatantes
- Fluidos de Bingham
- Fluidos pseudoplásticos com tensão inicial
- Fluidos dilatantes com tensão residual
- Fluidos tixotrópicos
- Fluidos reopéticos
- Fluidos viscoelásticos



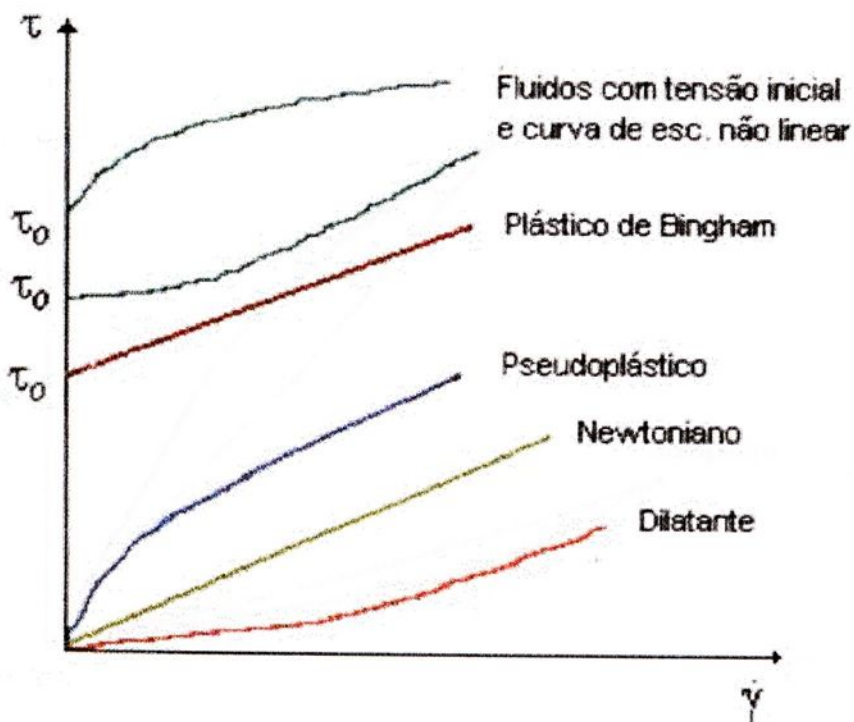


Figura 1 - Curvas de escoamento para vários tipos de fluidos independentes do tempo.

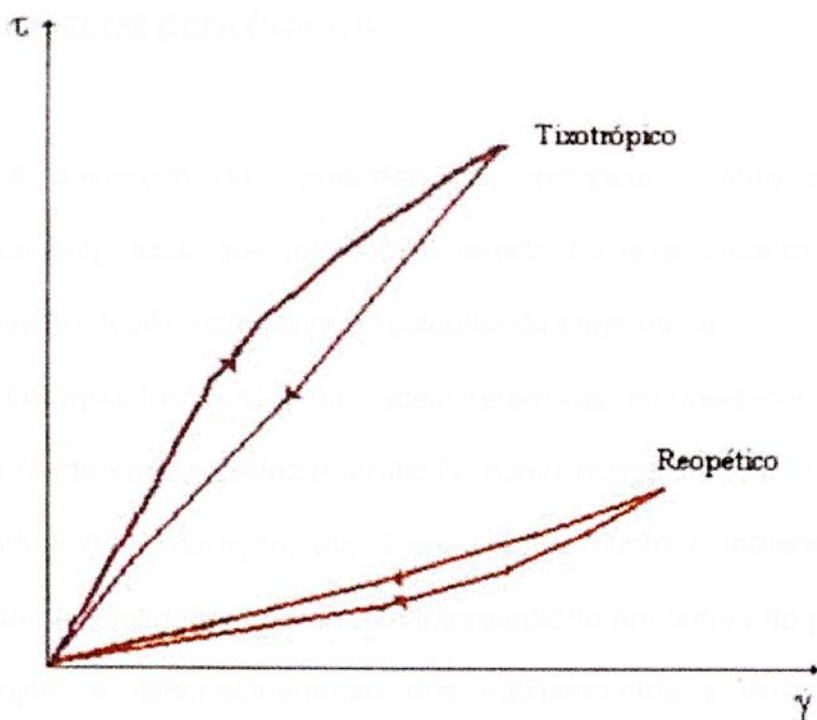


Figura 2 - Curvas de escoamento para fluidos com comportamento dependente do tempo.

3.4 - MODELOS REOLÓGICOS

A descrição do comportamento reológico é feita através de modelos empíricos, que relacionam tensão de cisalhamento e taxa de deformação, facilitando assim os cálculos de engenharia.

Os modelos reológicos podem relacionar propriedades reológicas de um fluido com grandezas práticas, como concentração, temperatura, pH, índice de maturação, etc. Esse conhecimento é indispensável no controle de qualidade, no controle intermediário em linhas de produção e no projeto e dimensionamento dos equipamentos e dos processos. Dependendo do comportamento, o modelo utilizado possui ou não a tensão inicial. Para os fluidos não newtonianos, os modelos são todos empíricos e representam o ajuste mais conveniente do reograma e, por este motivo, deve-se procurar usar sempre os modelos mais simples para descrever o comportamento de um produto.

Muitos modelos foram propostos para descrever o comportamento reológico. Os mais práticos, por serem mais simples, são: Ostwald-de-Waele (Lei de potência), Herschel-Bulkey, Mizrahi-Berk, Bingham e Casson. Neste trabalho foram utilizados os modelos de Ostwald-de-Waele e Bingham.



3.4.1- Modelo de Ostwald-de-Waelle

O modelo de Ostwald-de-Waelle, também conhecido como Lei da Potencia, é bastante utilizado para descrever o comportamento de alimentos (pseudoplástico e dilatante) devido a sua simplicidade e ampla aplicabilidade.

$$\tau = K * \gamma^n \quad (2)$$

onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa)

γ = taxa de deformação (s^{-1})

K = Índice de consistência ($Pa * s^n$)

n = Índice de comportamento (-)

O termo viscosidade aparente é expresso como:

$$\mu_a = - \frac{\tau}{\gamma} = K * \gamma^{n-1} \quad (3)$$

onde:

μ_a = Viscosidade aparente (Pa*s);

τ = tensão de Cisalhamento (Pa);

γ = Taxa de deformação (1/s)

O índice de comportamento é menor que a unidade para fluidos pseudoplásticos. Quanto menor o valor, mais intensa é a pseudoplasticidade, valores de n maiores que a unidade indicam comportamento dilatante.

3.4.2 - Modelo de Casson

Casson (1959) desenvolveu este modelo para uma suspensão de partículas interagindo em um meio Newtoniano, obtendo a seguinte expressão matemática:

$$\tau^{1/2} = K_{oc} + K_c \cdot \gamma^{1/2} \quad (4)$$

onde:

τ = Tensão de cisalhamento (Pa);

γ = Taxa de deformação (1/s);

K_{oc} = Tensão inicial (Pa)

K_c = Viscosidade plástica de Casson (Pa*s^{1/2})



Este modelo tem sido utilizado na estimativa da tensão inicial em alimentos (CHARM, 1960) e (VITALI & RAO, 1984) sendo adotado como método oficial para interpretar o comportamento reológico do chocolate pelo "international Office of Cocoa and Chocolate" (RAO & RIZVI, 1986).

Rao *et al.* (1981), para concentrados de tomate, mostraram que o modelo de Casson não ajusta bem os dados em baixas taxas de deformação e Vitali (1982) encontrou um bom reajuste dos dados com o modelo de Casson para purê de goiaba.

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

3.4.3 - Modelo de Herschel-Bulkey

O modelo de Herschel-Bulkley é uma forma modificada de Ostwald-de-Waele, (RAO e COLLEY, 1982), ou seja, o que diferencia um do outro é a presença (no primeiro modelo) ou ausência (no último) do termo da tensão de cisalhamento inicial. É um modelo análogo ao de Bingham, sendo representado pela equação 5.



$$\tau - \tau_{OH} = K_H \gamma^{n_H} \quad (5)$$

onde:

τ_{OH} = Tensão de cisalhamento inicial

K_H = índice de consistência

n_H = índice de comportamento do fluido

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

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

3.4.4 - Modelo de Mizrahi-Berk

Para descrever o comportamento reológico de suco de laranja concentrado, Mizrahi e Berk (1971), desenvolveram uma equação reológica baseada no modelo de uma suspensão de partículas interagindo em um solvente pseudoplástico. Esta resposta é modificação do Modelo de Casson, que se reduz a este quando n_m é igual a 0,5.

$$\tau^{1/2} - K_{OH} = K_M \gamma^{n_M} \quad (6)$$

onde:

τ = tensão de cisalhamento

γ = taxa de deformação

K_M = índice de consistência

n_M = índice de comportamento do fluido

K_{OM} = raiz quadrada da tensão inicial



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

3.4.5 – Modelo de Bingham

$$\tau - \tau_0 = \eta_p \dot{\gamma} \quad (7)$$

onde:

τ é tensão de cisalhamento, τ_0 tensão inicial, η_p viscosidade plástica de Bingham e $\dot{\gamma}$ taxa de deformação.

Fluidos newtonianos são caracterizados reologicamente apenas por um parâmetro que é a viscosidade. Porém uma única medida não é suficiente para identificar se um fluido é newtoniano. São necessários vários dados de tensão de cisalhamento e as correspondentes taxas de deformação, para então se avaliar o comportamento de um fluido e adotar um modelo de comportamento reológico (ONOFRE, 1995).



3.5 - PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE ALIMENTOS FLUIDOS

O conhecimento das propriedades reológicas é importante na manipulação dos produtos na indústria, principalmente quando os submetem as operações como; transporte, homogeneização, esterilização e concentração. No projeto de equipamentos destinados ao processamento de derivados de frutas, como sucos e purês, o conhecimento das propriedades ligadas aos seus padrões de escoamento determina a concepção e o dimensionamento dos equipamentos como bombas, tubulações, filtros, etc. (QUEIROZ *et al.*, 1996).

Devido à natureza complexa e diversificada dos produtos de fruta torna-se complicado uma generalização das propriedades reológicas para um determinado produto, pois estas informações são incompletas do ponto de vista prático.

Segundo Telis-Romero e Gasparetto (1993) existem pouquíssimos dados sobre a reologia, propriedades térmicas e parâmetros de projetos para soro de queijo, fazendo com que a maioria dos projetos de equipamentos sejam baseados em estimativas, pôr vezes grosseiras, de suas propriedades e comportamento.



De acordo com Holdsworth (1971), a maioria dos alimentos fluidos apresenta comportamento pseudoplástico, onde a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de deformação.

Ibarz e Pagan (1987) estudaram o comportamento reológico de suco de framboesa e observou que em altas concentrações (41,0 °Brix) e baixas temperaturas o comportamento é pseudoplástico enquanto que em baixas concentrações (11,0 °Brix) e altas temperaturas o comportamento é newtoniano.

Vários autores estudaram o comportamento reológico do suco de laranja concentrado: Mizhari e Berk(1974); Mizhari e Firstenberg (1975); Crandall *et al* (1982); Vitali (1983); Rao *et al* (1984) e Branco (1995). Todos estes autores encontraram comportamento pseudoplástico para o suco de laranja concentrado congelado.

O suco de laranja concentrado possui um comportamento de escoamento muito específico e complexo, portanto, é alvo de muitos estudos. Pôr ser um fluido não newtoniano, o dimensionamento dos equipamentos que envolvem o seu escoamento deve levar em consideração os dados reológicos, em função da temperatura e concentração de sólidos do produto (BERTO, 2000). Caracterização reológica do suco de laranja natural foi realizado pôr Varshney e Kumbhar (1978) que verificou comportamento praticamente newtoniano. Não foi encontrado na literatura de comportamento reológico especificamente de



soro de queijo. Isso é de grande interesse, pois teremos um comportamento que nunca foi estudado, necessitando assim de uma criteriosa caracterização.

3.6 - EFEITO DA CONCENTRAÇÃO E TEMPERATURA SOBRE OS PARÂMETROS REOLÓGICOS

No estudo das propriedades reológicas é importante conhecer, além da temperatura, a composição do soro, principalmente sólidos insolúveis, sólidos solúveis, gordura, acidez, sólidos totais. Pôr esta razão vários estudos já foram realizados em amostras que foram especialmente preparadas e cuja composição foi bem caracterizada.

A temperatura é um dos fatores que mais afetam a viscosidade, pois à maioria destas viscosidades apresentam-se na forma de sólidos dispersos em meios líquidos. Um aumento de temperatura diminui a viscosidade da fase líquida e aumenta o movimento das partículas em suspensão, diminuindo a viscosidade (PELEGRINE, 1999).

Sharma *et al* (1996) estudou o efeito da composição sobre as propriedades reológicas da polpa de tomate e verificou que a tensão de cisalhamento e taxa de deformação estão relacionadas com a composição da polpa, principalmente pectina, sólidos insolúveis e sólidos



totais. A tensão inicial aumentou com o aumento de sólidos insolúveis e pectina.

Rao *et al* (1985) estudou as propriedades reológicas de polpa de manga e concentrados que o material não apresenta tensão inicial, na faixa de concentração de 11 – 26 °Brix e temperatura de 25,0 – 62,0 °C. Também foi verificado o efeito da temperatura e concentração sobre o índice de consistência, ou seja, este último aumentou com o aumento da concentração e diminuiu seu valor com o aumento da temperatura. O índice de comportamento foi encontrado como sendo constante em todas condições.

As propriedades reológicas do suco de laranja na faixa de temperatura de 30 a 45 °C e concentrações de 13, 22 e 33 °Brix para o suco de laranja foram determinadas pôr Varshney e Kumbhar (1978) e verificaram que o índice de consistência aumentou com a concentração e diminuiu com a temperatura. O índice de comportamento decresceu com o aumento de temperatura.

Vitali e Rao (1982) observaram que o comportamento não-newtoniano de soro concentrado foi atribuído à presença de sólido solúvel de elevado peso molecular.

Os parâmetros relógios também são afetados pelas propriedades físicas, como também a forma das partículas em suspensão presentes nos sucos. Missaire *et al* (1990), trabalhando com compota de maça



homogeneizada e com partículas com diferentes tamanhos, verificou que a tensão inicial aumenta com o aumento do tamanho das partículas e conteúdo de polpa. Resultados contrários foram obtidos pôr Yoo e Rao (1994) estudando o comportamento reológico da polpa de tomate e Qui e Rao (1990) com compota de maça. Estes autores verificaram que a tensão inicial aumenta com o conteúdo de polpa e com o decréscimo do tamanho das partículas.



3.7 - PROPRIEDADES TÉRMICAS

3.7.1- Condutividade Térmica

Condutividade térmica é a taxa de energia que flui por condução, por unidade de tempo, normal a uma superfície de área unitária, quando se estabelece um gradiente de temperatura, entre duas superfícies paralelas e de espessura unitária. A condutividade térmica é denominada aparente (ou efetiva) quando são incluídos outros mecanismos de transmissão de calor, segundo (SWEAT, 1974).

A determinação da condutividade térmica de materiais biológicos é complexa, devido ao transporte simultâneo de energia e massa; às reações químicas e bioquímicas e às mudanças estruturais e biológicas que podem ocorrer durante a medição (PASSOS *et al.* 1990).

O método estacionário e o transiente são basicamente, os utilizados para medir a condutividade térmica. O método estacionário consiste em resolver a equação de condução de calor para o regime estacionário, em placas paralelas, cilíndricas ou esferas concêntricas, segundo (MOHSENIN, 1980). Estas placas, sob diferentes temperaturas, ficam sob um gradiente de temperatura que é função apenas da espessura da amostra no regime estacionário. O uso deste método é limitado pelo longo tempo que demanda e as formas geométricas da



amostra. Esse longo tempo pode causar perda de umidade da amostra e transferência de umidade no seu interior (REIDY e RIPPEN, 1980). Segundo esses últimos autores outros erros que podem ocorrer são: mau contato entre a resistência e a superfície da amostra; erro de medição do fluxo de calor e da temperatura; erro devido a transferência de calor por convecção na massa que constitui a amostra e heterogeneidade da mesma.

Os métodos de regime transiente consistem na resolução da equação de condução de calor em regimes transientes. Hooper e Lepper, citado por Sweat (1974), foram os primeiros pesquisadores a utilizarem o método transiente para determinar a condutividade térmica.

Dos métodos apresentados na literatura, o método de (DE VRIES, 1952) para determinação da condutividade térmica do solo, adaptado por (SWEAT, 1974), é considerado o mais adequado para materiais biológicos. Para utilizar este método, um termopar e um fio aquecedor são colocados no interior de uma agulha hipodérmica (sonda), que é inserida na amostra. Quando o registrador, ligado ao termopar da sonda, indicar uma temperatura constante, faz passar uma corrente elétrica no fio aquecedor, registrando-se a curva de aquecimento indicada pelo termopar.



A condutividade térmica da amostra é calculada pela equação 8.

$$K = \frac{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{4\pi(T_2 - T_1)} \quad (8)$$

onde:

k é a condutividade térmica.

Q é a potência por unidade de comprimento dissipada pelo fio aquecedor

T_1 e T_2 as temperaturas nos tempos t_1 e t_2 .

Esta é a expressão para temperatura de uma fonte térmica linear de comprimento infinito, num meio infinito e homogêneo. Entretanto na prática, a amostra é finita, a fonte tem comprimento finito, a intensidade da corrente elétrica não é perfeitamente constante, o raio e a massa da fonte não são nulos e suas propriedades térmicas diferem do material teste, conforme (CHANDRA e MUIR, 1971) e (SHARMA e THOMPSON, 1973). Assim, para compensar efeitos de comprimento da agulha, inércia térmica do sistema e outros erros, costuma-se acrescentar um termo de correção, sendo aconselhável, a calibragem do sistema empregando-se, geralmente, a glicerina, (PASSOS *et al.*, 1990).



Em consequência dos pequenos intervalos de tempo e pequenos gradientes de temperatura envolvidos, o efeito relativo ao mecanismo de transferência de energia por convecção é desprezível, (SWEAT e HAUGH, 1976). Segundo (BRACKWELL, 1956), fonte lineares de energia, com relação comprimento diâmetro maior que 20, geram erros inferiores aos experimentais e que as condições do experimento devem ser tais que a superfície externa da amostra permaneça numa temperatura constante durante a medição, para que se possa considerar a amostra como meio de dimensões infinitas. Sendo que, a variação da temperatura é função da espessura, do tempo, das propriedades térmicas e da extensão da fonte de calor, (MORITA e SINGH, 1979) e (WOODANS e NOWREY, 1978).

Para materiais biológicos, a condutividade térmica depende do seu teor de umidade ou concentração. Isto foi comprovado por vários autores que determinaram a variação da condutividade térmica em alguns produtos biológicos, em função de seu teor de umidade. Segundo (LEWIS, 1987) outros fatores que afetam a condutividade térmica em alimentos são a pressão, que é particularmente importante nas operações de liofilização e a temperatura. Para Krupiczka, citado por (SASSERON, 1984) a pressão não exerce influência sobre a condutividade térmica dos materiais biológicos. Em muitos alimentos o efeito da temperatura não é relevante; a condutividade é mais afetada pela estrutura celular (MOHSENIN, 1980) sugere que, se a condutividade varia linearmente



com a temperatura, o efeito dessa pode ser tomado pelo seu valor médio. Há poucas informações publicadas sobre condutividade térmica de alimentos a altas temperaturas. Alguns materiais biológicos e alimentos processados têm diferentes condutividades em diferentes direções. Um exemplo é a carne e peixe, onde o calor pode ser transferido melhor ao longo das fibras que transversais a essas.

Vários autores, citados por Mohsenin, (1980) e Lewis (1987) tem mencionado equações que relacionam a condutividade térmica com o conteúdo de umidade. Para valores mais aproximados, são relacionados com a composição. Dois modelos tem sido propostos, denominados modelo paralelo e modelo perpendicular. Ambos baseiam-se em sistema de dois componentes: sólido e água. A maior fonte de erro dessas aproximações é que ignora o ar dentro do alimento.



3.7.2 - Calor Específico

É necessário conhecer o calor específico para determinar a quantidade de energia a ser adicionada ou removida nos processos de aquecimento e resfriamento de alimentos. Este valor pode dar uma indicação da energia envolvida e nos processos contínuos pode ter uma influência sobre as dimensões do equipamento.

A variação de pressão para os processos que envolvem transferência de calor em materiais agrícolas é muito pequena. Em decorrência deste fato utiliza-se o conceito de calor específico à pressão constante.

Para muitos autores, o calor específico é dependente da temperatura. Porém, para muitos cálculos de engenharia, essas variações são pequenas e um valor médio é usado para uma faixa de temperatura considerada, (LEWIS, 1987); (DISNEY, 1954) e (KAZARIAN e HALL, 1965), relataram as dificuldades da obtenção do calor específico de materiais biológicos. A obtenção é complicada devido ao teor de umidade do material, calor de sorção e dissorção, movimentos internos de umidade e outros processos internos reversíveis ou irreversíveis.



A determinação experimental do calor específico de produtos agrícolas pode ser conduzida de duas maneiras: pelo método transiente ou método de mistura direta e pelo método do estado estacionário. O segundo método consiste em colocar a amostra numa pequena câmara aquecida por meio de corrente elétrica. A maior fonte de erro deste método está relacionada com a determinação da temperatura da amostra, devido ao gradiente de temperatura, segundo (WHIGHT e PORTERFIELD, 1970).

O método mais usado, segundo vários autores, é o da mistura direta que consiste em utilizar um recipiente isolado, de capacidade calorífica conhecida, com um líquido inerte. A amostra, a uma temperatura diferente da do líquido calorimétrico, é colocada no recipiente e a temperatura de equilíbrio é medida. O calor específico é calculado pela equação:

$$c_a m_a (T_a - T_e) + C(T_a - T_e) = c_m m_m (T_e - T_m) \quad (9)$$

onde:

c_a = calor específico da água, cal/g°C

c_m = calor específico do material, cal/g°C

C = capacidade calorífica do calorímetro, cal/°C

m_a = massa da água, g



m_m = massa do material, g

T_a = temperatura da água, °C

T_m = temperatura do material, °C

T_e = temperatura de equilíbrio, °C

Dentre as fontes de erro desse método, as duas mais importantes são: a troca de calor entre calorímetro e ambiente e a energia adicionada ao sistema por agitação, conforme (VIEIRA, 1992).

3.7.3 – Difusividade Térmica

Em termos físicos, a difusividade térmica é uma medida de como a temperatura pode mudar quando um material é aquecido ou resfriado. Assim, essa propriedade é importante quando considera transferência de calor em regime transiente.

A difusividade térmica pode ser determinada indiretamente utilizando a relação entre a condutividade térmica, calor específico e densidade. Na determinação experimental a metodologia proposta por (DICKERSON, 1965), é a mais utilizada.

A teoria deste método está baseada em uma condição de transferência de calor em regime transiente, através da qual as temperaturas da amostra aumentam com o tempo, portanto minimizando



a dificuldade de satisfazer condições de contorno. Simultaneamente, a diferença de temperatura que indica a difusividade térmica não varia com o tempo, assim facilitando a análise e interpretação dos dados.

O método produz dados aplicáveis ao o intervalo de temperatura através do qual o fluido é aquecido, e permite o cálculo da difusividade térmica a partir de um único experimento, (TELIS-ROMERO, 1991). As condições necessárias são satisfeitas quando o termo geral $\partial T/\partial t$, na equação de transferência de calor, é constante. Baseando-se na geometria do aparelho, (cilindro) a equação de variação de energia se reduz a:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A = \alpha \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} \quad (10)$$

Se não há gradientes de temperaturas paralelas ao eixo do cilindro e não existem diferenças de temperatura angular, chega-se a:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A = \alpha \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right\} \quad (11)$$

onde:

α é a difusividade térmica (m^2/s).

A é a taxa constante de elevação de temperatura em todos os pontos do cilindro.

Ao resolver essa equação para as condições de contorno manejadas ($T = At = TR$ em $T > 0$ e $r = R$; $dT/dr = 0$ em $t > 0$ e $r = 0$, qDickerson obteve que:

$$\alpha = \frac{AR^2}{4(T_s - T_c)} \quad (12)$$

4- MATERIAL E MÉTODOS

4.1- MATÉRIA-PRIMA

O soro utilizado neste trabalho foi obtido da fabricação de queijo tipo Minas Frescal pela adição de coalho. O leite utilizado foi fornecido por um produtor de São José do Rio Preto. A figura 1 mostra o fluxograma de obtenção do soro de queijo. O soro foi resfriado a 25°C e em seguida medida as propriedades térmicas e reológicas. Para obtenção do soro com diferentes teores de água e sólidos solúveis utilizou-se um roto evaporador a 45°C e 25 in de Hg de vácuo.



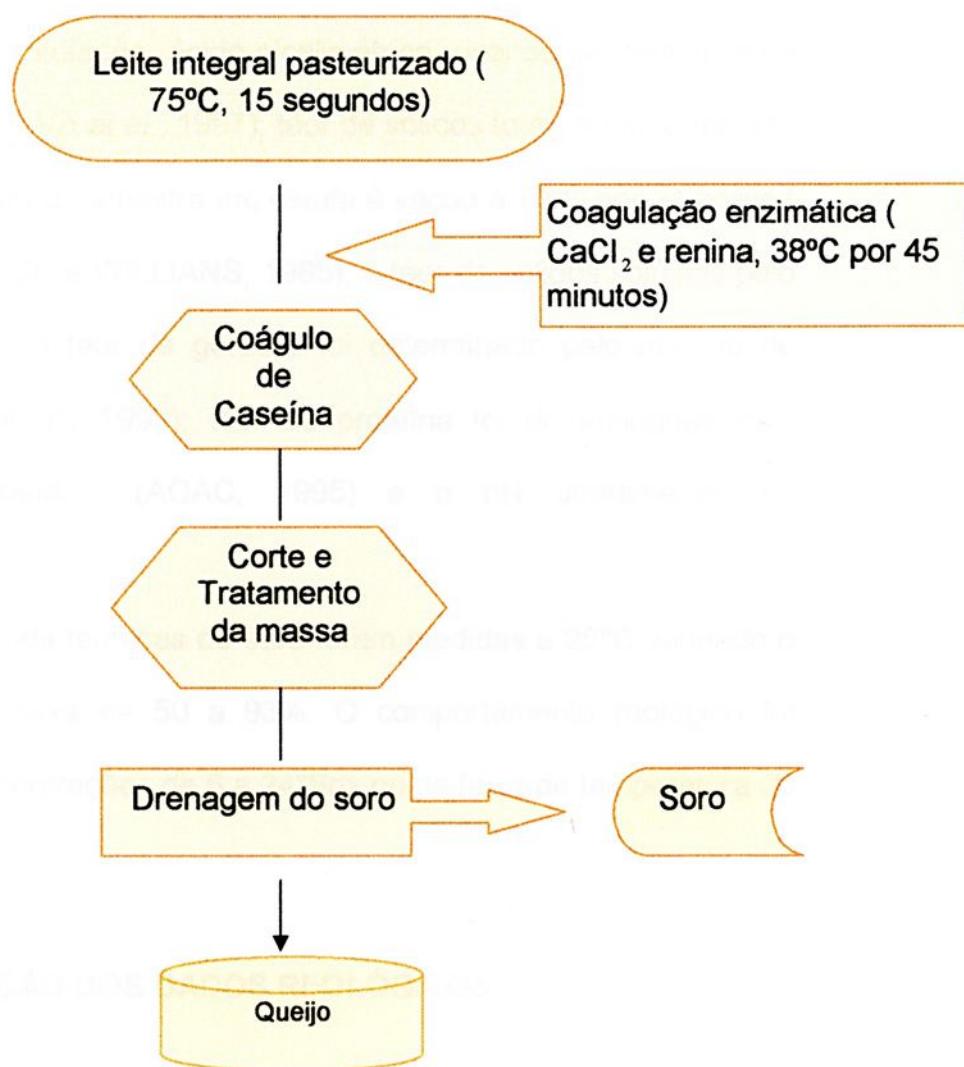


Figura 3 – Fluxograma da obtenção do soro

4.2- CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

Foram feitas análises físico-químicas do soro para determinação do teor de acidez, sólidos totais, gordura, proteína, pH. O teor de Acidez foi determinado pela titulação ácido-alcalimétrica usando-se fenolftaleína como indicador, (SILVA *et al.*, 1997); teor de sólidos totais foi determinado através de secagem da amostra em estufa à vácuo a 70°C por 24 horas (CASE, BRADLEY. Jr. e WILLIAMS, 1985); o teor de sólidos solúveis pelo refratômetro abbé; o teor de gordura foi determinado pelo método de Gerber, (SILVA *et al.*, 1997); teor de proteína foi determinadas pelo método Micro Kjeldahl (AOAC, 1995) e o pH diretamente em potenciômetro.

As propriedade térmicas do soro foram medidas a 25°C variando o teor de água na faixa de 50 a 93%. O comportamento reológico foi estudado nas concentrações de 6 a 24°Brix numa faixa de temperatura de 10 a 60°C.

4.3- DETERMINAÇÃO DOS DADOS REOLÓGICOS

4.3.1. Equipamento

Na obtenção dos dados reológicos utilizou-se um reômetro digital BROOKFIELD modelo RDV-III, equipado com um banho termostático para controle da temperatura da amostra. Este tipo de reômetro pode ser utilizado o sistema de placas em forma de disco.



Para as diferentes concentrações das amostras utilizou-se, o Cone Spindle CPE-40. O reômetro é conectado a um microcomputador que controla a operação. A cada 10s são registrados os dados de temperaturas, tensão de cisalhamento, taxa de deformação, viscosidade, torque e velocidade. As medidas reológicas foram determinadas nas temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C. As temperaturas utilizadas foram escolhidas por abranger uma ampla faixa de processamento e armazenagem.



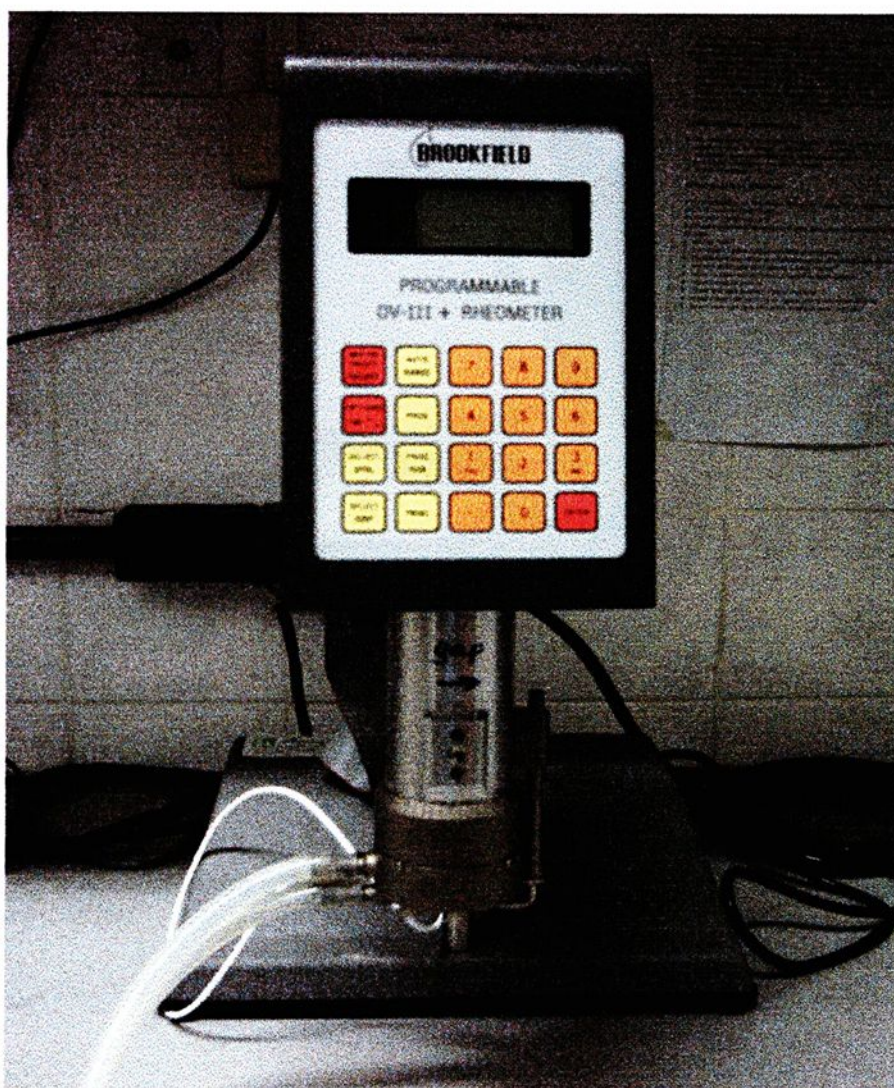


Figura 4- Reômetro utilizado no estudo do comportamento reológico do soro.

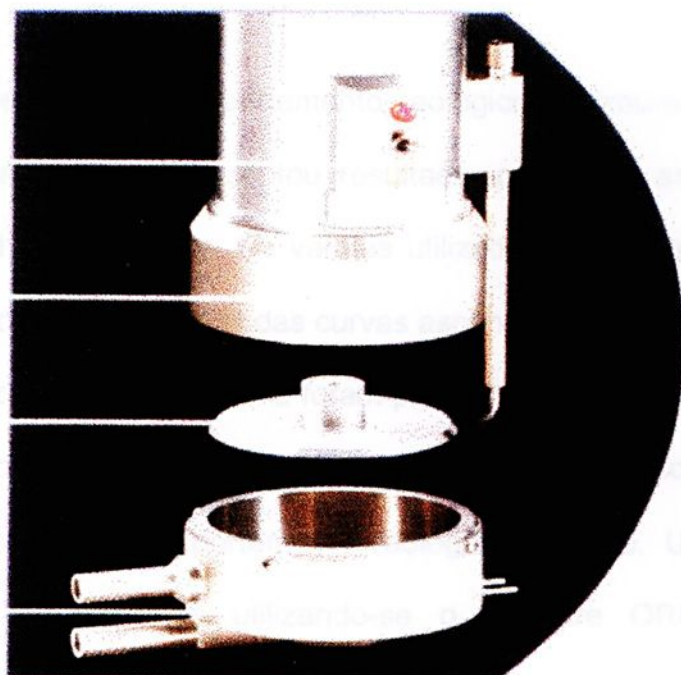


Figura 5 - Reômetro utilizado, sistema de placas, cone Spindle CPE-40.



T. 1347/05

4.3.2- Cálculo do Comportamento Reológico

No estudo do comportamento reológico, utilizou-se o sistema de placas paralelas, que apresentou resultados para todas as concentrações e temperaturas adotadas. Os valores utilizados para a análise reológica são as médias das medidas das curvas ascendente e a descendente.

Os dados experimentais foram previamente processados usando o software do próprio sistema e buscando os modelos que melhor representassem o comportamento reológico do soro. Um ajuste mais detalhado foi realizado utilizando-se o software ORIGIN 4.1 para avaliação dos modelos previamente selecionados. Os modelos de Ostwald-de-Waele, Bingham e Casson foram os que melhor ajustaram os dados experimentais. Os parâmetros para avaliar o ajuste dos modelos foram o coeficiente de determinação R^2 , qui-quadrado X^2 e a soma dos quadrados dos resíduos SSR.

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

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

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



4.4 - PROPRIEDADES TÉRMICAS

4.4.1- Condutividade Térmica

Para medir a condutividade térmica do soro do leite, utilizar-se-á a técnica da fonte de calor linear em regime transiente. Uma sonda com fonte linear de energia, similar à de (SWEAT 1974), foi construída e calibrada com glicerina. Essa sonda, é constituída de uma agulha hipodérmica de 0,55 mm de diâmetro externo e 3,0 cm de comprimento, através da qual foi introduzido um par termoeletrico de cobre-constantan no seu ponto médio e um fio aquecedor de constantan, estendendo-se ao longo de todo comprimento. A relação entre o comprimento e diâmetro da sonda foram aproximadamente 54. Satisfazendo a condição recomendada por (BLACKWELL, 1956).

O sistema de aquisição de dados é formado por uma bancada automatizada por (PASSOS *et al.* 1980), que consisti de dois circuitos independentes: o circuito do termopar, cujas extremidades são ligadas diretamente a um dos canais de aquisição de dados (modelo HP - 3421 - A), e o circuito do fio aquecedor, conectado em série a uma fonte reguladora de tensão, um resistor de constantan (R valendo cerca de 1 ohm) e um canal atuador da aquisição de dados (canal 0). A aquisição de dados está conectada a um microcomputador, através de uma interface



IEEE - 488. Através de um programa feito em turbo-pascal, o canal zero é fechado, energizando a sonda com uma corrente da ordem de 180 mA, que vale por unidade de comprimento da sonda cerca de 3,22 W/m. Após testes, optou-se pelo intervalo de tempo de 1,7 a 4,8 segundos, sendo considerados os pontos entre a sexta e a décima sétima medidas de temperatura, que são usados no cálculo da inclinação da reta, temperatura versos $\ln$ do tempo.

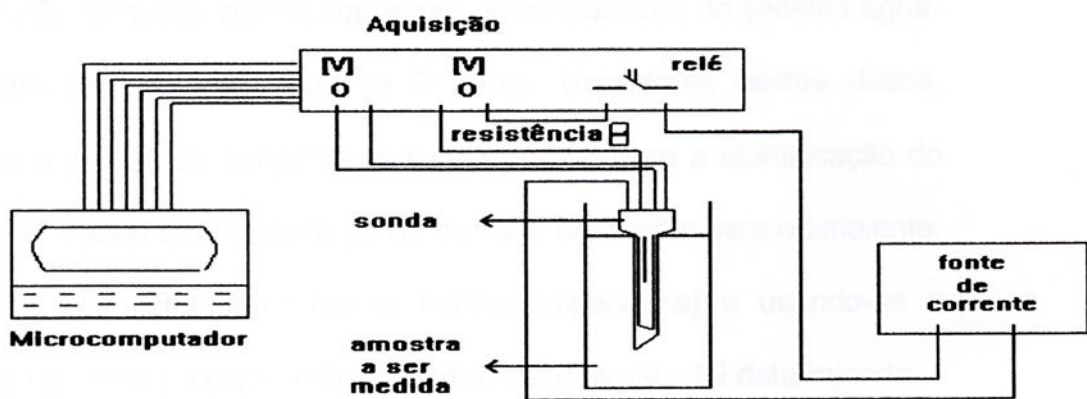


Figura 6 - Diagrama esquemático da montagem experimental para medir a condutividade elétrica.



4.4.2- Calor Específico

Determinou-se o calor específico do soro do leite baseado na metodologia proposta por (HWANG e HAYAKAWA, 1979), Para tanto, utilizou-se um calorímetro construído em trabalhos anteriores, empregando um frasco criogênico de capacidade de 1 litro, isolado por lã de vidro e envolvido por um tubo de policloreto de vinil. Dentro do qual se colocou um fluido de troca de calor de massa igual a 200g de propriedades térmicas conhecida (água). A temperatura do sistema água-calorímetro foi registrada durante 2 horas. Usando-se destes dados, traçou-se o gráfico da temperatura versus tempo para a identificação do ponto onde iniciou uma taxa de perda de calor constante para o ambiente. Da história do calorímetro (curva tempo-temperatura) e usando-se a temperatura inicial do calorímetro, a capacidade térmica foi determinada.

Da lei da conservação da energia, a quantidade de calor cedida pela água deve ser igual ao absorvido pelo calorímetro mais à perda de calor do sistema para o ambiente.

O material (soro em diferentes teores de água) de cuja capacidade calorífica é desconhecida, com massa de 100g e temperatura inicial medidas, será introduzida no calorímetro. A evolução da temperatura até o equilíbrio será acompanhada por meio de termopares colocados no interior do calorímetro. Por meio de um balanço global de massa e energia



no sistema isolado termicamente se determina o valor do calor específico, utilizando a equação 9.

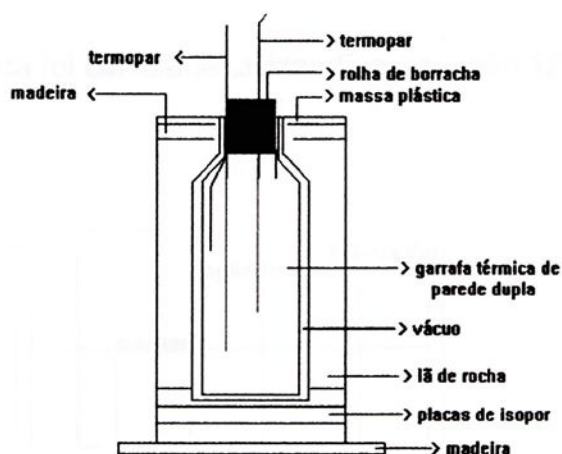


Figura 7 - Esquema do calorímetro.

4.4.3 - Difusividade Térmica

O conjunto experimental para determinação de α consiste de um banho de água termostatzado, aquecido a uma taxa constante e da célula de medida. Os termopares são localizados no centro e na superfície do tubo e ligados a uma chave seletora polarizada, que é ligada a um indicador de temperatura. São lidas as temperaturas interna e externa, a cada 1 minuto. A taxa de aquecimento desejada é por volta de $1^{\circ}\text{C}/\text{min.}$, que é controlada pelo ajuste da tensão.

A taxa de aquecimento de $1^{\circ}\text{C}/\text{min.}$, confere uma maior precisão quando ocorre pequenas oscilações de temperatura ($\cong 0,1^{\circ}\text{C}$) e apresenta um trecho linear mais estendido com uma diferença de temperatura adequada ao experimento.

A difusividade térmica foi calculada utilizando a equação 12.

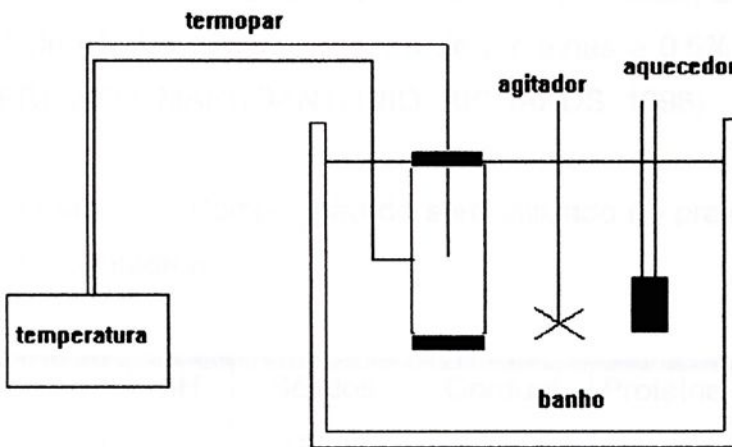


Figura 8 - Montagem experimental para medir a difusividade térmica.

5- RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1- CARACTERIZAÇÃO DO SORO

A composição do soro integral está mostrada no quadro 3. Os valores encontrados estão próximos aos da literatura que mencionam os seguintes valores: pH entre 5,8 a 6,6, 93 a 94% de água, 0,1 a 0,6 de gordura, 4,5 a 5,0% de lactose, 0,8 a 1,0% de cinzas, acidez de 10 a 20° D, 6,7 de sólidos totais, 0,7 a 1,5 de proteínas e 0,5% de sais minerais (SIVIERI, 2002; MARCOANTONIO; RICHARDS, 1998).

Quadro 3. Composição do soro utilizado no presente trabalho em porcentagem.

	pH	Sólidos Totais	Gordura	Proteína	Acidez
Soro integral	6,1	6,5	0,5	0,9	14,5°D

A variação no teor de proteínas mencionada na literatura pode estar relacionada à dificuldade de padronização no processamento dos queijos elaborados em laboratório, como também variações na composição do leite, Siqueira *et al.* (2002).

Os componentes que mais variam no leite são as gorduras e as proteínas, por influenciarem pouco a pressão osmótica, papel desempenhado pelos minerais e lactose. Esta variação no leite é decorrente da sua composição inicial influenciada por fatores como raça do animal, alimentação, período do ano e lactação (VEISSEYRE, 1988; CHR.HANSEN, 1998).



A caseína e a gordura do leite tem um papel fundamental no rendimento do queijo e, portanto, nas variações do teor de sólidos totais do soro. A caseína, durante a coagulação, ao formar a rede de paracaseinato de cálcio, “aprisiona” em diferentes proporções (CHR. HANSEN, 1998).

5.2- COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO SORO

O ajuste dos dados experimentais foram feitos pelo modelo de Osvaldd-de-Waelle, Casson e Bingham. Sendo que este último foi o que apresentou melhores ajustes para todas as concentrações e temperaturas utilizadas neste trabalho. Portanto, é mostrado a seguir os ajustes e os parâmetros para este modelo.

Para os ajustes foi utilizada a curva ascendente e descendente, sendo tomado o valor médio da tensão de cisalhamento para cada taxa de deformação. Nos reogramas representados pelas figuras 9 a 16, verifica-se que a leitura para γ foi realizada a partir de 75 s^{-1} . Isto porque, este trabalho tem como objetivo a descrição do comportamento reológico para aplicação às operações industriais de processamento e nesses casos a taxa de deformação é sempre maior que 100 s^{-1} (VIDAL 1997). Segundo Branco citado por Vital (1997), nas aplicações industriais é importante o conhecimento dos parâmetros reológicos, pois, além do consumo de energia para bombear um produto com maior viscosidade, há



problemas devido à incorporação de ar, acarretando problemas de operação da bomba e ações indesejáveis como oxidação e contaminação.

Os gráficos da taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) versus a tensão de cisalhamento (τ) para o soro nas diferentes concentrações, de 6, 12, 18 e 24 °Brix nas temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C, encontram-se nas figuras de 9 a 16.

A temperatura é um dos fatores que mais afetam a viscosidade de produtos que possuem sólidos dispersos em meios líquidos. Um aumento da temperatura neste caso faz com que a viscosidade da fase líquida diminua, aumentando a mobilidade da gordura e estrutura das proteínas, diminuindo conseqüentemente a viscosidade. Para temperaturas menores como 10°C, esse fator é ainda mais pronunciado. Em termos gerais, quanto mais alto for o coeficiente de viscosidade maior será o efeito da temperatura. Comportamento semelhante é verificado para vários produtos fluidos com suco de manga (VITAL 1997), suco de abacaxi e laranja (VARSHNEY e KUMBHAR 1978) e suco de laranja (VIEIRA 1996).



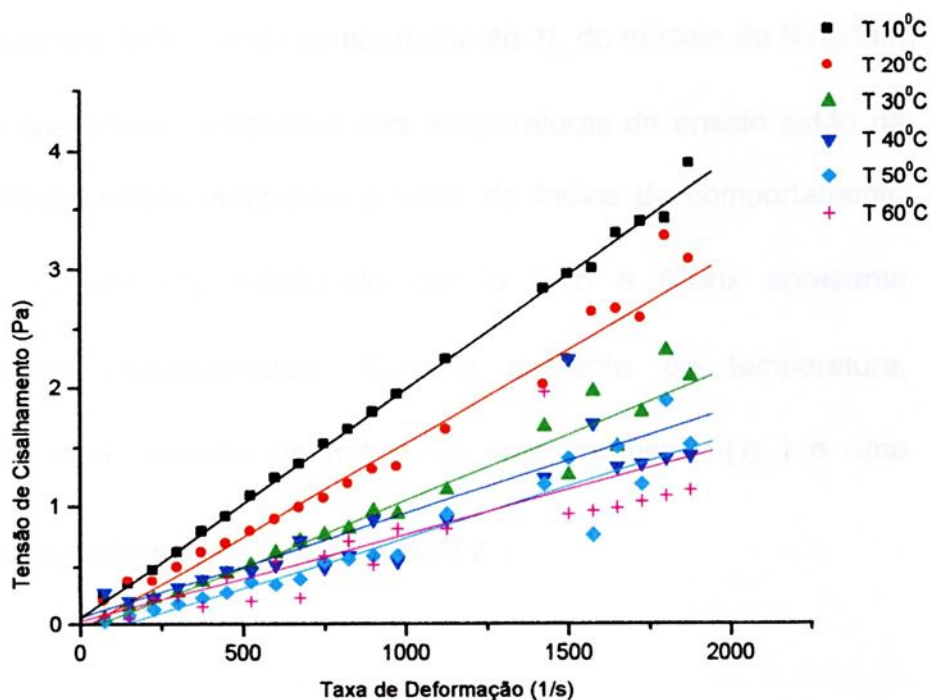


Figura 9 - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para o soro com concentração 6°Brix com temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C, curva ascendente.

Tabela 1. Parâmetros do modelo de Bingham para o soro à 6°Brix, curva ascendente.

	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
η_p	0,0516	-0,0489	-0,0690	0,0560	-0,1201	0,0256
τ_0	0,0019	0,0015	0,0011	8,833e ⁻⁴	8,556e ⁻⁴	7,394e ⁻⁴
χ^2	0,0033	0,0238	0,0222	0,0859	0,0375	0,0945
SSR	0,0763	0,5482	0,5115	1,9769	0,8598	2,1818
R²	0,9972	0,9708	0,9467	0,7427	0,8617	0,6469

Os valores do índice de comportamento η_p do modelo de Bingham bem como sua análise estatística nas temperaturas de ensaio estão na tabela 1. Nesta tabela verifica-se o valor do índice de comportamento η_p menor que um (1), mostrando que o soro a 6°Brix apresenta comportamento pseudoplástico. Com o aumento da temperatura, observou-se uma variação no índice de comportamento (η_p) e uma diminuição no parâmetro da tensão inicial (τ_0).



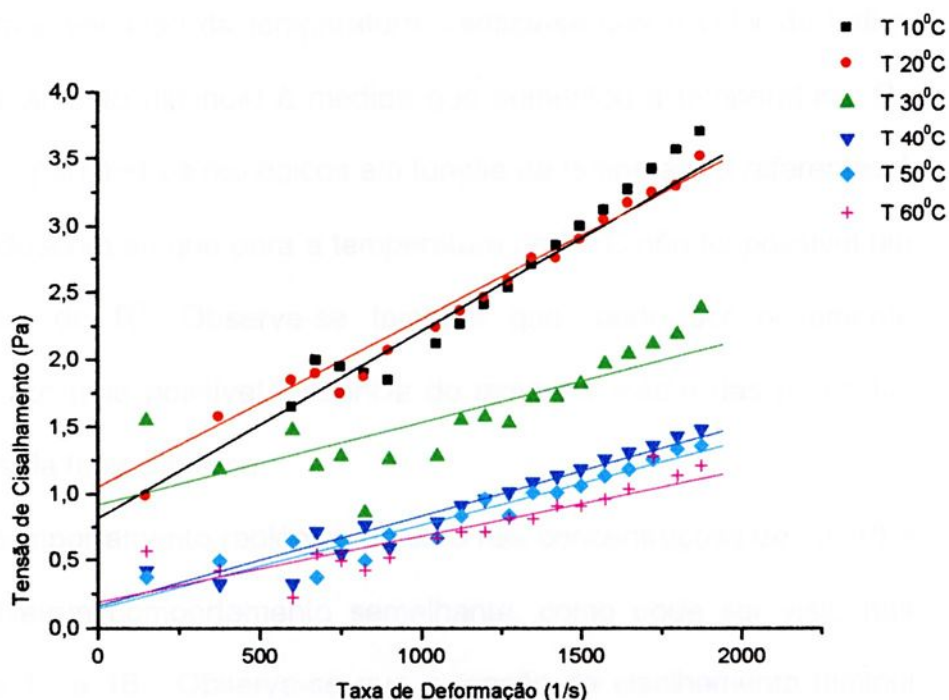


Figura 10 – Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para o soro com concentração à 6°Brix com temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C, curva descendente.

Tabela 2. Parâmetros do modelo de Bingham para o soro à 6°Brix, curva descendente

	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
η_p	1,3775	0,8185	0,9182	0,1607	0,1412	0,1877
τ_0	0,0010	0,0014	6,108e ⁻⁴	6,693e ⁻⁴	6,209e ⁻⁴	4,896e ⁻⁴
χ^2	0,2065	0,0089	0,1098	0,0185	0,0106	0,0254
SSR	4,7504	0,2065	0,5192	0,4244	0,2445	0,5840
R²	0,6099	0,9856	2,5263	0,8853	0,9202	0,7501

Com a variação da temperatura, verifica-se que o valor do índice de comportamento diminuiu à medida que aumentou a temperatura. Os ajustes dos parâmetros reológicos em função da temperatura referentes à tabela 2. Observa-se que para a temperatura de 30°C não foi possível um bom ajuste do R^2 . Observa-se também que, pode ser novamente explicado por uma possível influência do tamanho médio das partículas suspensas da fase dispersa.

O comportamento reológico do soro nas concentrações de 12, 18 e 24°Brix, tiveram comportamento semelhante, como pode ser visto nas figuras de 11 a 16. Observa-se que a tensão de cisalhamento diminui com o aumento da temperatura para uma mesma taxa de deformação. Sendo um aumento mais pronunciado a 10°C. Uma explicação para esse comportamento é o fato da gordura a temperaturas baixas estar num estado mais solidificado, aumentando a tensão de escoamento. Enquanto que, em temperaturas mais altas ocorre uma liquefação da gordura. Esse efeito é mais pronunciado à medida que aumenta a concentração do soro. Com o aumento da concentração o ajuste do modelo de Bingham melhora independente da temperatura, conforme mostrado nas tabelas. Em termos gerais, quanto maior for o coeficiente de viscosidade maior será o efeito da temperatura.



Nas Tabelas de 3 à 8 estão apresentados os valores dos parâmetros obtidos através do ajuste aos reogramas pelo modelo de Bingham, para as concentrações 12, 18 e 24°Brix. Nessas concentrações o comportamento dos parâmetros foram semelhantes apresentando menores valores de X^2 , além dos valores mais elevados para o coeficiente de determinação R^2 .

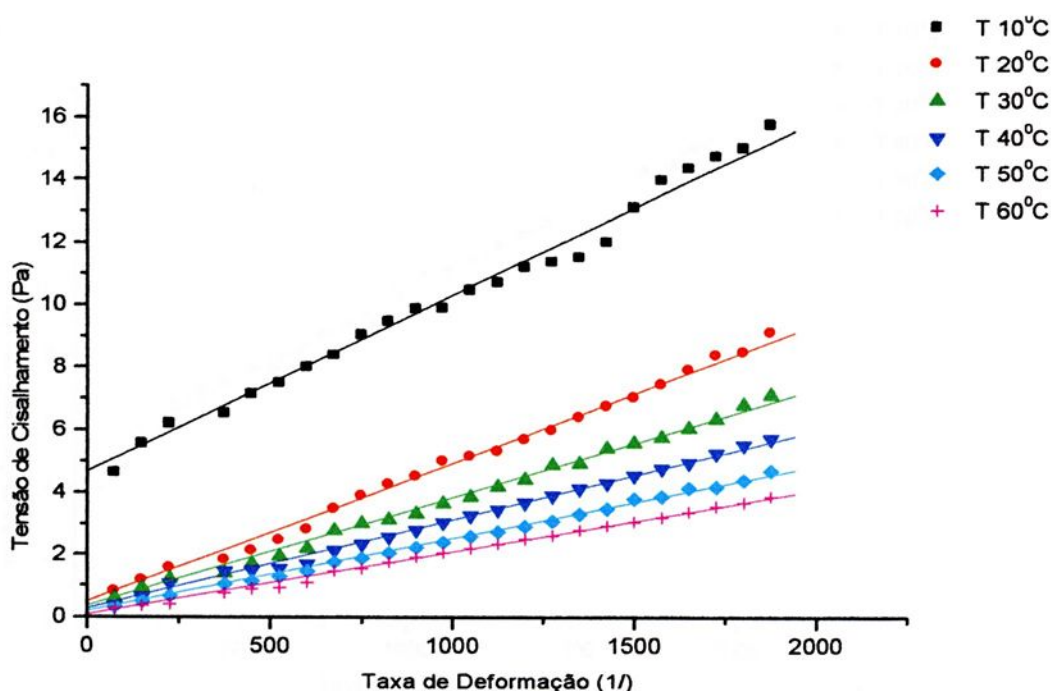


Figura 11 – Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para o soro com concentração à 12°Brix com temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C, curva ascendente.

Tabela 3. Parâmetros do modelo de Bingham para o soro à 12°Brix, curva ascendente.

	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
η_p	3,7604	0,6128	0,1535	0,0829	0,0715	0,1697
τ_0	0,0059	0,0038	0,0031	0,0024	0,0021	0,0018
χ^2	0,283	0,0321	0,0321	0,0057	0,0019	0,0023
SSR	6,5319	0,7390	0,7390	0,1319	0,0453	0,0532
R²	0,9747	0,9965	0,9931	0,9968	0,9985	0,9978

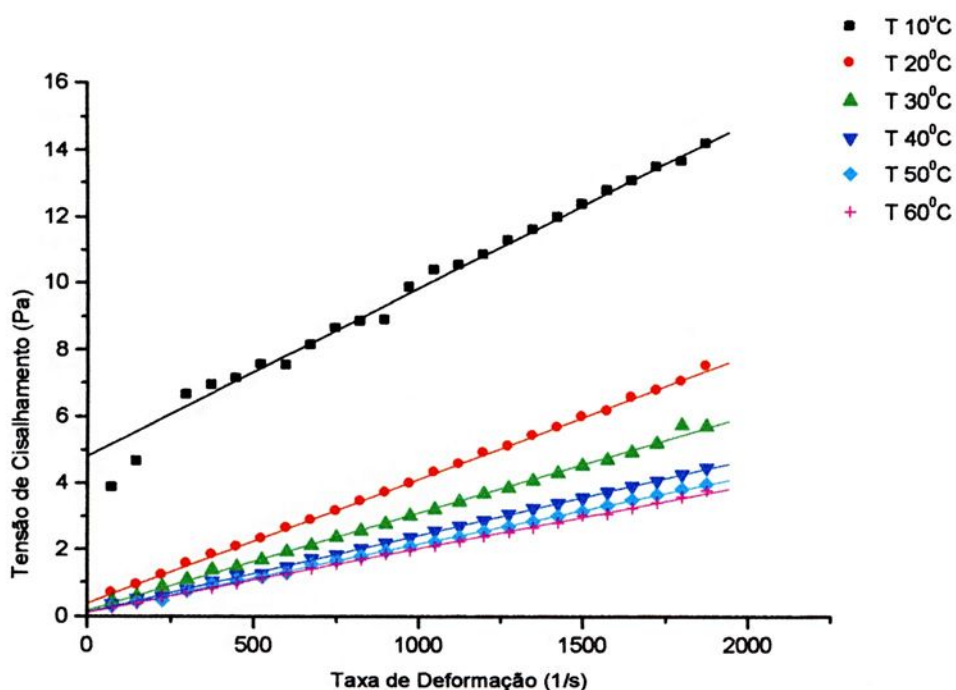


Figura 12– Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para o soro com concentração à 12°Brix com temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C, curva descendente.

Tabela 4. Parâmetros do modelo de Bingham para o soro à 12°Brix, curva descendente.

	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
η_p	4,8164	0,3714	0,1578	0,1031	0,0996	0,1001
τ_0	0,0050	0,0037	0,0029	0,0023	0,0021	0,0019
X^2	0,3539	0,0021	0,0059	0,0017	0,0013	0,001
SSR	8,1392	0,0475	0,1374	0,0271	0,0298	0,0231
R²	0,9576	0,9995	0,9978	0,9993	0,9990	0,9991

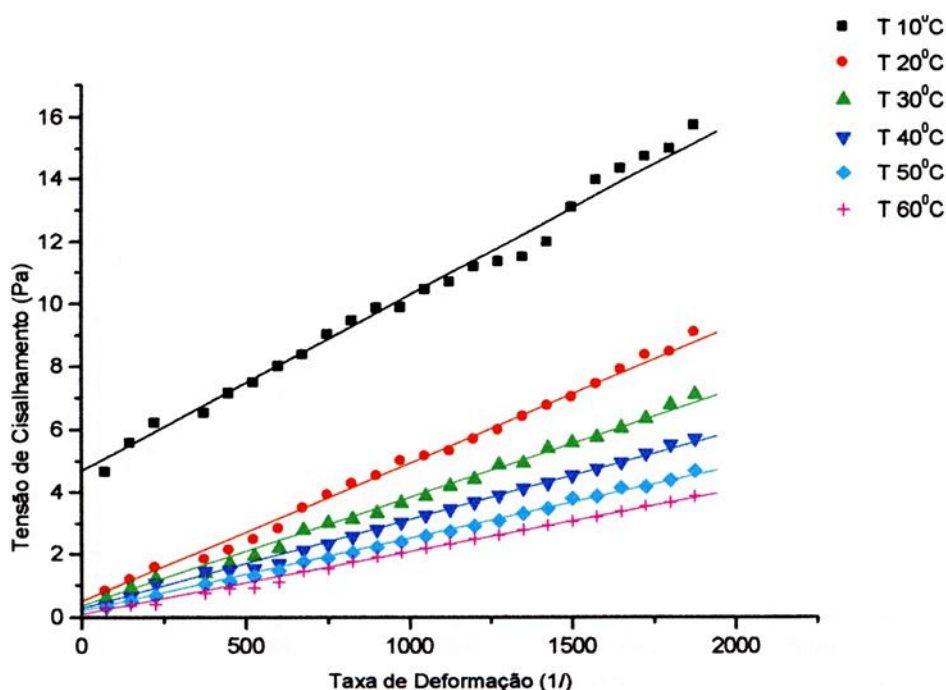


Figura 13 – Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para o soro com concentração à 18°Brix com temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C, curva ascendente.

Tabela 5. Parâmetros do modelo de Bingham para o soro à 18°Brix, curva ascendente.

	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
η_p	4,6772	0,4910	0,3575	0,2712	0,1889	0,0864
τ_0	0,0050	0,0037	0,0029	0,0023	0,0021	0,0019
χ^2	0,11712	0,02801	0,01579	0,00569	0,00215	0,00391
SSR	2,57664	0,61616	0,34744	0,11942	0,04505	0,08201
R²	0,98884	0,99567	0,99603	0,99787	0,99879	0,99698

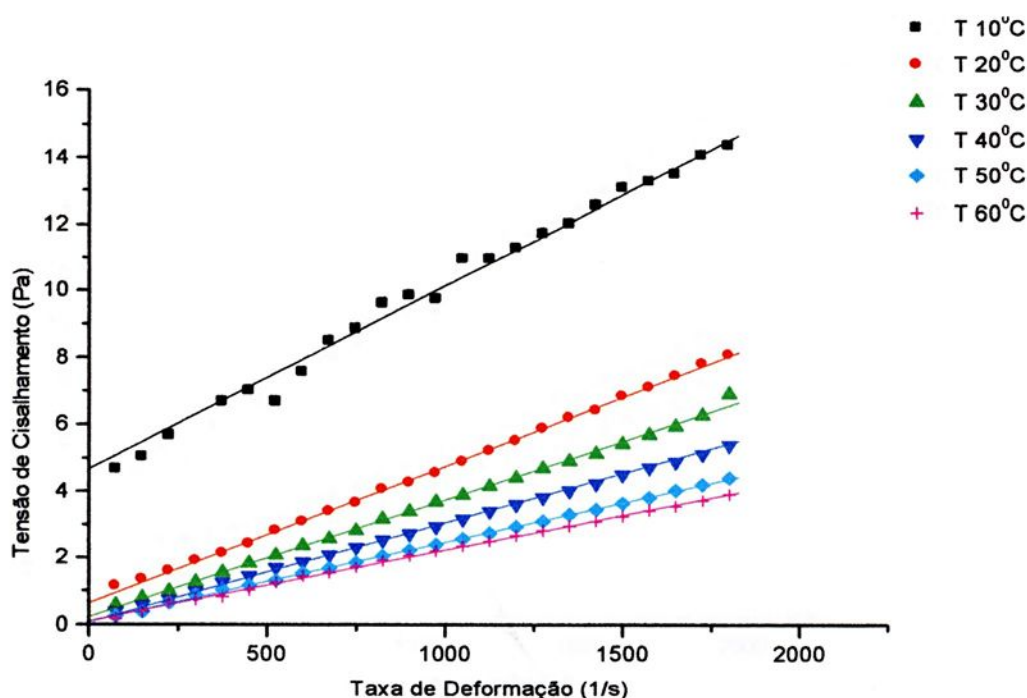


Figura 14 – Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para o soro com concentração à 18°Brix com temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C, curva descendente.

Tabela 6. Parâmetros do modelo de Bingham para o soro à 18°Brix, curva descendente.

	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
η_p	4,5228	0,6208	0,2203	0,0553	0,0771	0,0994
τ_0	0,0056	0,0041	0,0035	0,0029	0,0029	0,0021
χ^2	0,0642	0,0065	0,0082	0,0194	0,0007	0,0019
SSR	1,3478	0,1356	0,1729	0,4066	0,0149	0,0375
R²	0,9935	0,9988	0,9979	0,9936	0,9997	0,9987

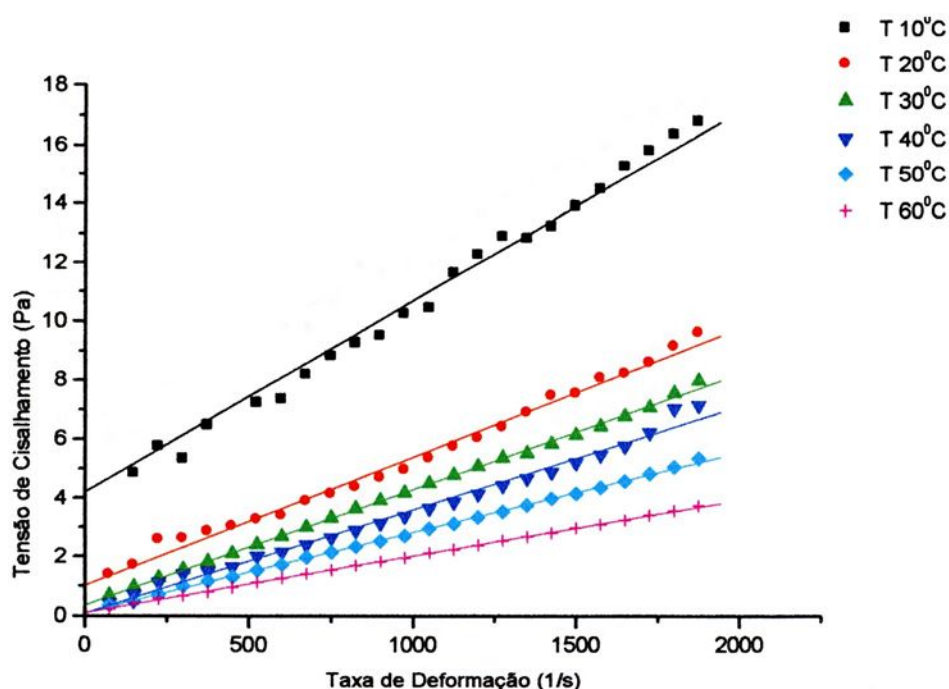


Figura 15 – Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para o soro com concentração à 24°Brix com temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C, curva ascendente.

Tabela 7. Parâmetros do modelo de Bingham para o soro à 24°Brix, curva ascendente.

	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
η_p	4,1991	1,0007	0,3434	0,0722	0,0917	0,0957
τ_0	0,0065	0,0044	0,0039	0,0035	0,0027	0,0019
X^2	0,0642	0,0065	0,0082	0,0194	0,0007	0,0018
SSR	1,3478	0,1356	0,1729	0,4066	0,0149	0,0375
R²	0,9935	0,9988	0,9978	0,9932	0,9996	0,9987

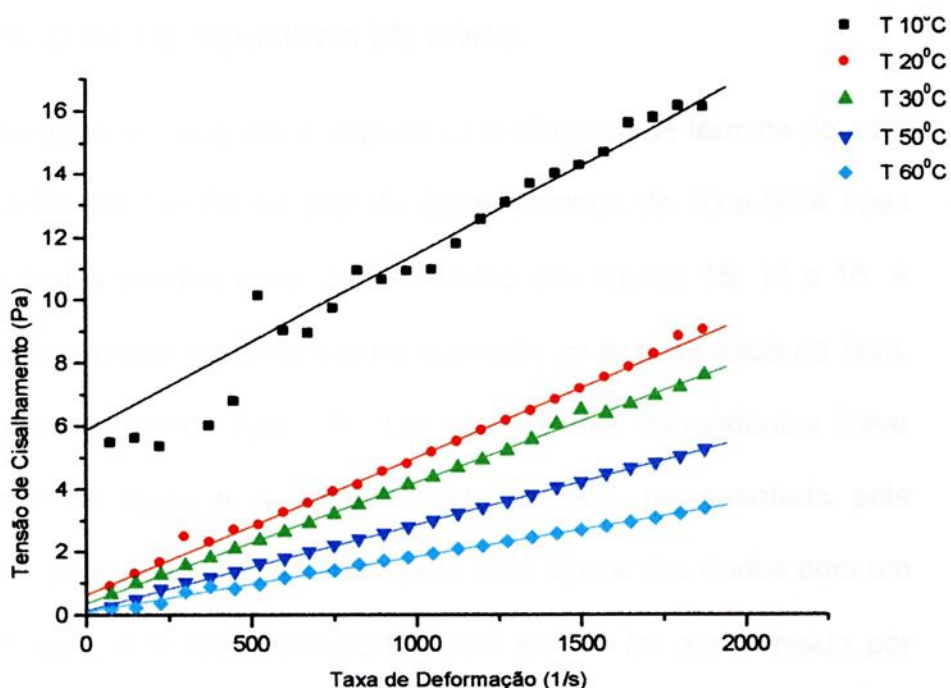


Figura 16 – Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para o soro com concentração à 24°Brix com temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C, decrescente.

Tabela 8. Parâmetros do modelo de Bingham para o soro à 24°Brix, curva decrescente.

	10°C	20°C	30°C	50°C	60°C
η_p	5,8686	0,6164	0,3517	0,1247	0,0877
τ_0	0,0056	0,0044	0,0039	0,0027	0,0017
χ^2	0,1494	0,0215	0,0089	0,0011	0,0035
SSR	2,6884	0,4945	0,2069	0,0259	0,0801
R²	0,0988	0,9964	0,9981	0,9995	0,09964

5.3- PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SORO

Condutividade térmica, calor específico e difusividade térmica do soro foram medidos em função do teor de água variando de 50 a 93% base úmida. Os dados obtidos estão apresentados nas figuras 16, 17 e 18. A condutividade térmica aumenta com o aumento do teor de água no soro, conforme é mostrado na figura 16. Observa-se uma dependência linear entre o teor de água e a condutividade térmica, representado pela Equação 13, podendo ser constatado pelo bom ajuste dos dados com um valor de r^2 igual a 0,9943. Comportamento similar foi apresentado por Vieira (1996) para o suco de laranja e por Telis-Romero *et al.* (2000) para o extrato de café.

$$K = 0,1969 + 0,0041X_w \quad (13)$$



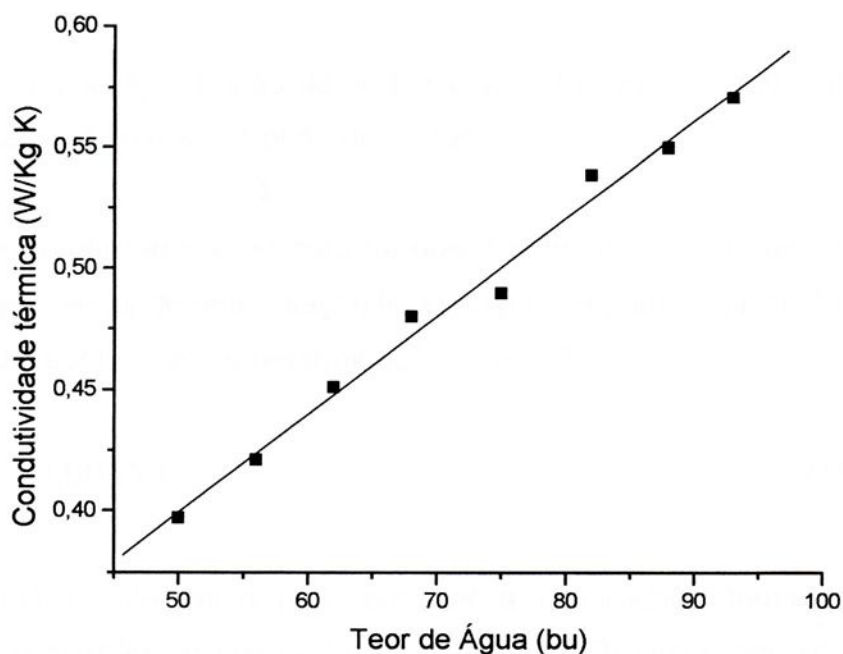


Figura 17. Condutividade térmica do soro de queijo em função do teor de água. O símbolo corresponde aos dados experimentais e a linha a valores usando a Equação 13.

Um modelo baseado na condutividade térmica aparente de cada componente proposta por Choi e Okos citado por Rao e Rizvi (1986) foi testado. Esse modelo está representado pela Equação 14 e apresentou um coeficiente de determinação r^2 acima de 0,9867.

$$K = 0,61X_w + 0,2X_p + 0,0205X_c + 0,175X_o + 0,13X_a \quad (14)$$

onde:

X_w = fração de água; X_p = fração de proteína; X_c = fração de carboidrato;
 X_o = fração de gordura e X_a = fração de cinzas.

A difusividade térmica do soro de queijo aumenta com o aumento do teor de água, segundo uma relação linear expressa pela Equação 15 e resultando num coeficiente de determinação r^2 de 0,9912.

$$\alpha = 0,8333 + 0,0055X_w \quad (15)$$

Um modelo alternativo para prever a difusividade térmica é baseado na expressão desenvolvida por Riedel (1969) citado por Telis-Romero (2000). Este modelo foi testado, mas apresentou baixo coeficiente de determinação r^2 inferior a 0,9.



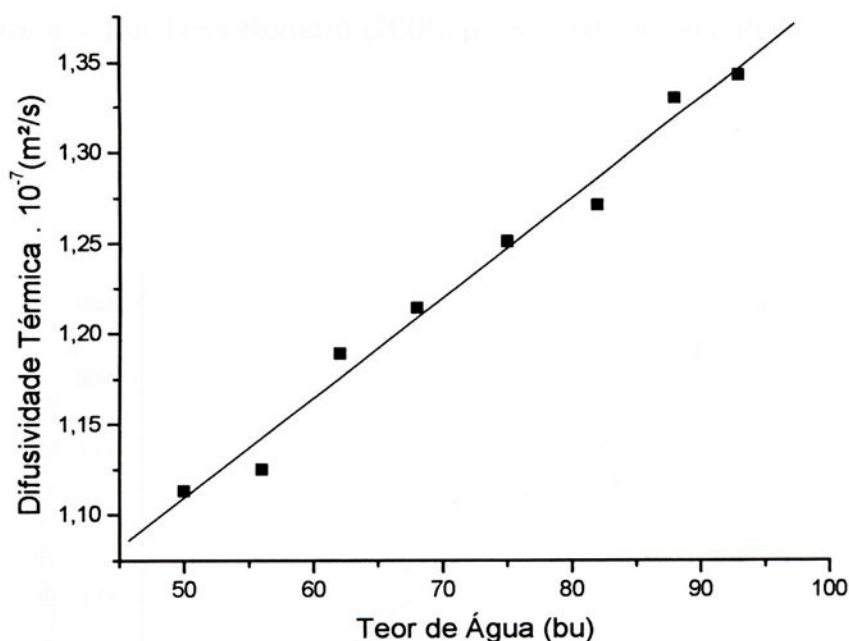


Figura 18. Difusividade térmica do soro de queijo em função do teor de água. O símbolo corresponde aos dados experimentais e a linha a valores usando a Equação 15.

O calor específico do soro de queijo, mostrado na figura 18, aumenta com a elevação do teor de água. Os dados experimentais podem ser bem correlacionados por uma função linear representados pela Equação 16, que resultou num coeficiente de determinação r^2 igual a 0,9847.

$$C_p = 1377,72 + 27,69X_w \quad (16)$$

Comportamento semelhante foi obtido por Vieira (1996) para o suco de laranja e por Telis-Romero (2000) para o extrato de café.

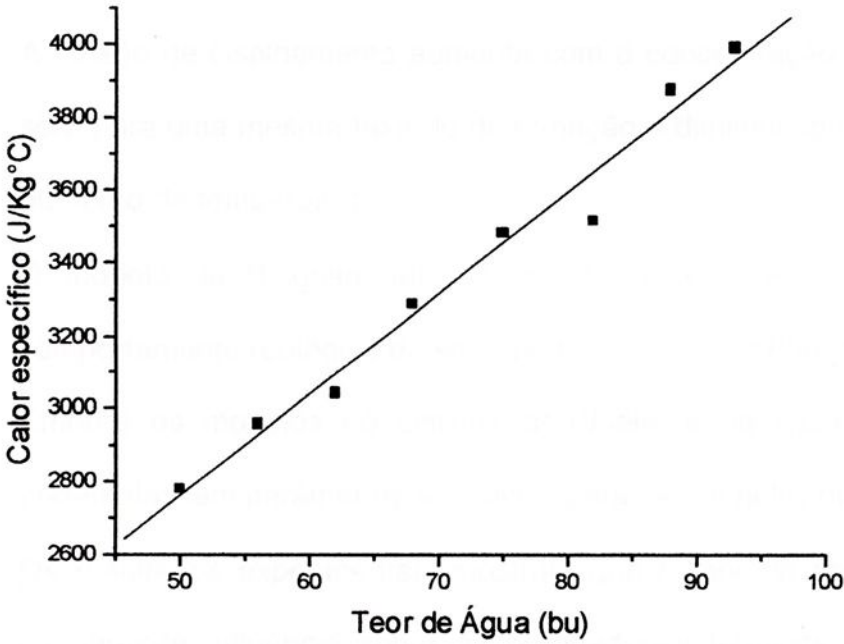


Figura 19. Calor específico do soro de queijo em função do teor de água. O símbolo corresponde aos dados experimentais e a linha a valores usando a Equação 16.

Segundo Heldman & Singh (1981), apresentam para o soro um valor de 1.675 para o calor específico da gordura sólida e usa 2.094 para gordura líquida e descreveram a equação :

$$C_p = 1.424X_c + 1.549X_p + 1.675X_o + 0.837X_a + 4.187X_w \quad (17)$$

6. CONCLUSÕES

- O soro de queijo, nas concentrações de 6, 12, 18 e 24°Brix e nas temperaturas de 10 a 60°C, pode ser descrito por um modelo de Bingham.
- A tensão de cisalhamento aumenta com a concentração do soro para uma mesma taxa de deformação e diminui com o aumento da temperatura.
- O modelo de Bingham foi o que melhor representou o comportamento reológico do soro, na faixa de 75 a 1850 s^{-1} . Embora os modelos de Ostwald-de-Waele e de Casson apresentassem parâmetros aceitáveis para serem aplicados.
- Os resultados experimentais mostram que o teor de água tem grande influência sobre as propriedades térmicas do soro de queijo. O aumento dos valores das propriedades térmicas aumentaram com o teor de água entre 50 e 93% b.u, pode ser descrito por uma regressão linear.
- Os dados experimentais da condutividade térmica, calor específico e difusividade térmica podem ser ajustados com sucesso pelos modelos teóricos e empíricos. As equações empíricas deste trabalho foram utilizadas para estimar essas propriedades para o soro de queijo com teor de água entre 50 e 93% b.u.



7. SUGESTÕES

- Sugerimos ampliar o estudo do comportamento reológico do soro para concentrações acima de 24°Brix, onde se observa formação de cristais.
- Estudar o comportamento reológico do soro numa faixa de temperatura mais ampla, principalmente a temperaturas inferiores a 10°C.
- Estudar a influência da temperatura nas propriedades térmicas do soro de queijo.



8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AMSTALDEN, L.C. **Estudo da deposição de Hesperidina em evaporadores da Indústria de Citrus.** Campinas (SP): UNICAMP, 1996. 94 p. Tese de Mestrado.

AOAC – ASSOCIATION of OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of Analysis**, Washington, 16^a ed., 1995.v. 1-2.

AWADHWAL, N. K. & SING, C. P., 1985. A rheological model for milh products. **Journal of Food Science**, v.50, p.1611-1614, 1985.

BENEZECH, T.; MAINGONNAT, J. F. Characterization of the rheological properties of yogurte - a review. **Journal Of food Engineering**, França, v.21, n.4, p.447-472, agosto, 1994.

BERTO, M. I. **Modelagem matemática e Simulação Dinâmica de Trocadores de Calor de Placas para o Resfriamento de Sucos de Laranja Natural e Concentrado.** Campinas (SP): UNICAMP, 2000. 110 p. Tese de Mestrado.



BRANCO, I. G. **Suco de Laranja Concentrado – Comportamento Reológico à Baixas Temperaturas**. Campinas (SP): UNICAMP, 1995. 91 p. Tese de Mestrado.

BRACKWELL, J.H. - The axial-flow error in the thermal conductivity by probe. **Canadian Journal of Physics**, **34(4)**:412-417, 1956.

CAL-VIDAL, J. Ultrafiltração de soro lácteo e aproveitamento de seus componentes. **Revista do Instituto Laticínios Cândido Tostes**, p.23-35, 1979.

CAMPOS, S. D. S., 1989. **Reologia e Textura de Alimentos**. ITAL. Campinas: ITAL, 1989, 84p.

CASE, R.A., BRADLEY JR., WILLIAMS, R.D. Chemical and physical Methods. In: American Public Health Association – **Standard methods for the Examination of Dairy Products**. 15 ed. Washington, 1985. p.327-404.

CASSON , N., 1959, A Flow equation pigment-oil suspensions of the printing ink type, in Rheology of Disperse Suspensions, C. C. Mill (Ed), (Pergamon press, New York).

CHANDRA, S. & MUIR, W.E. - Thermal conductivity of spring wheat at low temperatures. **Transaction of the ASAE**, **14(4)**:644-646, 1971.

CHARM, S. **Viscometry of on-newtonian food materials**. Food Research, Chicago, 25 (3): 351-362, 1960.



CHR.HANSEN. O Rendimento da Fabricação de Queijos: Métodos para a avaliação e comparação, **Informativo Há-La Biotec**, v.7, n.43-44, 1998.

CRANDALL, P.G., CHEN, C.S. and CARTER, R.D. Models for Predicting Viscosity of Orange Juice Concentrate. **Food Technology**, n. 36, vol.5, p.545-252, 1982.

DICKERSON, R.W. - An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. **Food Technology**, 5: 193-204, 1965.

DISNEY, R.W. - The specific heat of some cereal grains. **Cereal Chemistry**, 31(3): 229-239, 1954.

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

HWANG, M.P. & HAYAKAWA, K. - Development of a new procedure for the determination of specific heat of food products. **Journal Series University of New Jersey (paper 08903)**, 1979.

IBARZ, A.; GARVIN, A.; COSTA, J. Rheological Behaviour of Slal (*Primus Spinosa*) Fruit Juices. **Journal of Food Science**, v. 6, p. 423-431, 1996.

IBARZ, A.; PAGÁN, J. Rheology of Raspberry Juices. **Journal of Food Engineering**, v.6, p. 269-289, 1986.



KAZARIAN, E.A. & HALL, C.W. - Thermal properties of grain. **Transaction of the ASAE**, 8(1): 33-38, 1965.

KENNEDY, R.S., G.P.KONOK, et al., 1995. The use of whey protein concentrate in the treatment of patients with metastatic carcinoma: a phase I-II clinical study. **Anticancer Research**, 15: 2643-2649.

LEWIS, M.J. - **Physical properties of foods and food processing systems**. Ellis Horwood, Chichester, 1987.

MARCHINI, M. Utilization de los suero de lecheria em la alimentacion humana. **Rev – industria Lechera**, n.712, p.32-37, 1998.

MARCOTE, M., HOSHAHILI, A. R. T. & RAMASWAMY, H. S., 2001. Rheological properties of selected hydrocolloids as a function of concentration and temperature. **Food Research International**, Canadá, v.34, p.695-703, março 2001.

MARCO ANTONIO, L. P.; RICHARDS, S.P.S. Avaliação da aceitabilidade de uma bebida lactea à base de soro, destinada ao público infantil. In: **Congresso Brasileiro de Ciência e tecnologia de Alimentos**, 16, Rio de Janeiro, 1998 Anais 1 CD-ROM.

MISSAIRE, F.; QUIU, C-G.; RAO, M. A. Yield Stress of Structured and Unstructured Food Suspensions. **Journal of Texture Studies**, v. 21, p. 479-490, 1990.

MIZRAHI, S.; FIRSTENBERG, R. Effect of Orange Composition on Flow Behaviour of Six Fold Concentrate. **Journal of Texture Studies**, v.4, n.6, p.523-532, 1975.



MIZRAHI, S.; BERK, Z. Flow behaviour of Concentrated Orange Juice: Mathematical Treatment. **Journal of Texture Studies**, v.3, n.1, p.69-79, 1971.

MOHSENIN, N.N. - **Thermal properties of food and agricultural materials**. New York, Science Publishers, 1980.

MORITA, T. & SINGH, R.P. - Physical and thermal properties of short-grain rough rice. **Transaction of the ASAE**, **22(3)**: 630-636, 1979.

ONOFRE, P. M. **Redução da Viscosidade em Suco de Laranja com Tratamento enzimático**. Campinas (SP): UNICAMP, 1995. 71 p. Tese de Mestrado.

PARODI, P.W. A role for milk proteins in câncer prevention. **The Australian Journal of Dairy Technology**, v.53, p. 37-47, 1998.

PASSOS, E.F.; ESCOBEDO, J.F.; NUNES, E.L.; GEOCZE, K.C. & OLIVEIRA, C.F.P. Automatização de uma bancada para medição de condutividade térmica com sonda miniaturas. **XI Seminário Adunesp**, Guaratinguetá, 1990.

PELEGRINE, D. H. **Comportamento Reológico das Polpas de Manga e Abacaxi**. Campinas (SP): UNICAMP, 1999. 115 p. Tese de Mestrado.



QIU, C. G. & RAO, M. A. Role of Pulp Content and Particle Size in Yield Stress of Apple Sauce. **Journal of Food Science**, 1990, v. 53, n.4, p. 1165-1170.

QUEIROZ, A. J. M. **Estudo do Comportamento Reológico dos Sucos de Abacaxi e Manga**. Campinas (SP): UNICAMP, 1998. 170 p. Tese de Doutorado.

RALPH, W. **Profits in whey**. Rural Research 116:22-7, 1982

RAO, K. L.; EIPESON, W. E.; RAO, P. N. S.; PATWARDHAN, M. V.; RAMANATHAN, P. K. Rheological Properties of Mango Pulp and Concentrates. **Journal of Food Science and Technology**, v. 22, n. 1, p. 30-33, 1985.

RAO, M. O and COLEY, H. J. Applicability of flow models qith yield for tomato concentrates. **Journal of Food Process Engineering**, n. 3, v. 6, p. 159-173, 1981.

RAO, M.A. Rheological properties of fluid foods. In: RAO, M.A. & RIZVI, S. S. H (eds), **Engineering properties of foods**, p. 1-47, MARCEL DEKKER, New York, Food Science and Technology series, n.19, 1986.

REIDY, G.A. & RIPEEN, A.L. - Methods for determining thermal conductivity in foods. **Transaction of the ASAE**, 14(2): 248-254, 1971.

RICHARDS, N.S.P.S Soro Lácteo: Perspectivas industriais e proteção ao meio ambiente. **Food Ingredients**, n.17, p. 20-27, 2002.



SANTOS, J. P. V.; FERREIRA, C.L.L.F. Alternativas para o aproveitamento de soro de queijo nos pequenos e médios laticínios. XVII Congresso Nacional de Laticínios, **Revista do instituto de Laticínios Cândido Tostes**, v.3, p.44-50, 2001.

SASSERON, J.L. - **Avaliação de propriedades físicas e curvas de secagem em camadas finas de amêndoa de cacau.** Universidade Federal de Viçosa, 1984. (tese de Mestrado).

SCHILIEPHAKE, D. I. **On the structure of aqueous sucrose solutions.** Zucker, Hannover, 16 (9): 523-527, 1963.

SHARMA, D.K. & THOMPSON, T.L. - The specific heat and thermal conductivity of grain sorghum. **Transaction of the ASAE**, **16(1)**:114-117, 1973.

SHOEMAKER, C. F.; NANTZ, J.; BONNANS, S.; NOBLE, A. C. Rheological characterization of dairy products. **Food Technology**, v.36, n.1, p.98-102, 104, 1992.

SILVA, P.A.F.; PEREIRA, D.B.C.; OLIVEIRA, L.L.; COSTA JUNIOR, L.C.G. **Físico-química do Leite e Derivados: Métodos analíticos.** Juiz de Fora: Oficina de Impressão, 1997. 190p.

SIQUEIRA, I. M.; SOUZA, M. R.; CERQUEIRA, M. M. O. P.; GLÓRIA M. B. A. Caracterização físico-química de quatro tipos de soro de queijo. In: XIX Congresso Nacional de Laticínios. **Revista do Instituto Laticínios Cândido Tostes**, p. 225-227, 2002.



SIVIERI, K. **Caracterização e otimização de gorduras em bebidas lácteas**. Tese de Doutorado em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, 2002.

SWEAT, V.E. & HAUGH, C.G. A thermal conductivity probe for small food samples. **Transaction of the ASAE**, **17(1)**:56-8, 1974.

TELIS-ROMERO, J.; GASPARETTO, C. A. Parâmetros de Escoamento do Suco de Laranja Concentrado Utilizando dados da Força de Arraste Atuando sobre uma Esfera. **XXI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos**. Ouro Preto, Minas Gerais, v.1, 243-254, 1993.

TELIS-ROMERO, J. Temperature and water content influence on thermophysical properties of coffee extract. **International J. of food Properties**, 2000. 3 (3): 375-384.

TELIS-ROMERO, J.; VIEIRA, J.A.G. Reologia de fluidos alimentícios com taxa de deformação intermediária utilizando o reômetro de esfera descendente. Encontro sobre escoamento em meios porosos, (ENEMP)- São Carlos, anais, IV 1, 323-334, 1992.

USDEC – **Unidet States Dairy Export Coucil**. Principais Características da proteína de soro, características nutricionais e atividade Biológica relatada. v.5, n.4, 2003.

USDEC – **Unidet States Dairy Export Council**. Manual de Referência para produtos de Soro dos E.U.A. Arlinghtow: USDEC, 1997.



VASHNEY, N. N.; HUMBHAR, B. K. Effect of Concentration and Temperature on Rheoloical Properties of Pineapple and Orange Juices. **Journal of Food Science and Technology**, v. 15, n.2, p.53-55, 1978.

VEISSEYRE, R. **Lactologia Técnica**. Zaragoza. Acribia, 1980, 629 p.

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

VIEIRA, J.A.G. **Propriedades físicas e Convecção no Escoamento de Suco de Laranja em Tubos**. Tese de Doutorado. UNICAMP. 125p. 1996.

VITALI, A. A. **Comportamento Reológico do Suco de laranja Concentrado Congelado à Baixas Temperaturas**. Faculdade de Engenharia Química EPUSP. Tese de Doutorado, 1983.

VITALI, A. A.; RAO, M. A. Flow Behaviour of Guava Puree as a Fuction of Temperature and Concentration. **Journal of Texture Studies**, v. 13, p. 275-289, 1982.

YOO, B.; RAO, M. A. Effect of Unimodal Particle Size and Pulp Content on Rheological Properties of Tomato Puree. **Journal of Texture Studies**, v. 25, p. 421-436, 1994.



WRIGHT, M.E. & PORTERFIELD, J.G. - Specific heat of spanish peanut. **Transactions of the ASAE, 13(4):** 508-510, 1970.

WOODANS, E.E. & NOWREY, J.E. - Literature values of thermal conductivities of foods. **Food Tecnology, 22:** 150-158, 1978.



