



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA - UESB
MESTRADO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE ALIMENTOS
CAMPUS JUVINO OLIVEIRA

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E COMPORTAMENTO
REOLÓGICO DO LEITE E DO SORO DE BÚFALA

LAÍSE TELES DA SILVA E SILVA

ITAPETINGA- BA
2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA - UESB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E COMPORTAMENTO
REOLÓGICO DO LEITE E DO SORO DE BÚFALA

LAÍSE TELES DA SILVA E SILVA

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB, como parte integrante das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, área de concentração em Engenharia de Processos de Alimentos, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientadora:

Prof^ª. DSc. Jane Sélia dos Reis Coimbra

Co-Orientadores:

Prof. DSc. Modesto Antonio Chaves

Prof^ª. DSc. Renata Cristina Ferreira Bonomo

ITAPETINGA – BA

2014



Áreas de Concentração: Engenharia de Alimentos
Ciência de Alimentos

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

Título: PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO LEITE DO SORO DE BÚFALA.

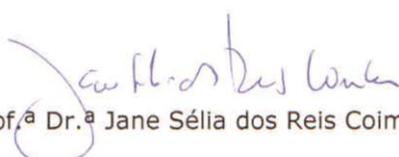
Autor (a): Laíse Teles da Silva e Silva

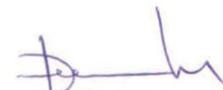
Orientador (a): Prof.^a Dr.^a Jane Sélia dos Reis Coimbra

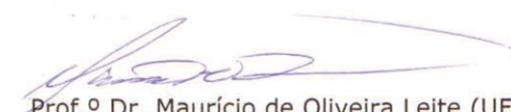
Co-orientador (a): Prof.^o Dr. Modesto Antônio Chaves

Prof.^a Dr.^a Renata Cristina Ferreira Bonomo

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de **MESTRE EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE ALIMENTOS, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE ALIMENTOS**, pela Banca Examinadora.


Prof.^a Dr.^a Jane Sélia dos Reis Coimbra (UFV)


Prof.^o Dr. Sérgio Augusto de Albuquerque Fernandes (UESB)


Prof.^o Dr. Maurício de Oliveira Leite (UFV)

Itapetinga-BA., 25 de julho de 2014.

AGRADECIMENTOS

“Tudo posso naquele que me fortalece” Filipenses 4:13 . Com certeza não teria chegado até aqui se não tivesse sido sustentada por Deus a todo instante. Toda honra e toda glória é dada a Ti Senhor!

Agradeço imensamente à minha família, pelo amor incondicional. Em especial aos meus pais, Lenilde e Raimundo, e os meus sobrinhos: Pedro, Bia, Lulu e Fellipe, toda vez que pensava em desistir, lembrava-me do rostinho de cada um e a força brotava.

Agradeço a Jordavi, por ter se tornado um anjo em minha vida, obrigada pelo carinho, amor e principalmente pela paciência.

À equipe Offlline, pelo companheirismo e suporte diário.

Às minhas colegas do CEDETEC, não tenho palavras para agradecer tanto carinho e a amizade: Virginia, Juliana e Jeane. Amo vocês.

Aos meus poucos, porém verdadeiros amigos: Ícaro Pereira, Lílian Carvalho e Jara Santos, estaremos juntos sempre e pra sempre.

À minha estrela guia meu eterno amigo Daniel Rocha, senti sua presença ao meu lado todo instante.

À minha orientadora Professora Jane Sélia pela honrosa orientação, ensinamentos e toda contribuição.

Ao meu co-orientador Professor Modesto Chaves, falta-me palavras para agradecer todo apoio, incentivo, ajuda, ensinamentos, confiança e amizade.

À Professora Renata Bonomo, pela co-orientação.

À CAPES pela concessão da bolsa.

RESUMO

SILVA, L.T.S. **Propriedades Termofísicas e Comportamento Reológico do Leite e do Soro de Búfala**. Itapetinga–BA: UESB, 2014. 65p. (Dissertação–Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos).

Dados de caracterização termofísica, reológica e físico-química de produtos alimentícios fluidos são essenciais tanto para o dimensionamento e projeto de equipamentos para a industrialização de alimentos, e bem como para atuarem como indicadores da qualidade do produto e do seu processamento. Neste contexto, este trabalho disponibilizou, para o leite e o soro de búfala desidratados por liofilização, dados avaliados: (i) de caracterização por meio das análises físico-químicas e composição química; (ii) das propriedades termofísicas calor específico, difusividade térmica, massa específica, e condutividade térmica cujos teores de sólidos totais variaram de (5, 20, 35, 50, 65 e 80)% e temperatura entre (5, 20, 35, 50, 65, 80 e 95)°C; e, (iii) do comportamento reológico dos fluidos, com teores de sólidos totais de 5%, 20%, 35% e 50% na faixa entre (15, 25, 35, 45, 55 e 65)°C. Os valores encontrados no presente estudo para a caracterização físico-química apresentaram-se na faixa de dados da literatura para o leite e o soro de búfala in natura. Houve aumento da massa específica dos fluidos com a redução do teor de água e consequente aumento do teor de sólidos. O calor específico das amostras diminuiu com o aumento da concentração. A difusividade térmica reduziu proporcionalmente com a redução do conteúdo de umidade. Foi constatado elevação da condutividade com o aumento da temperatura. Notou-se aumento dos valores de viscosidade aparente do leite e do soro com o aumento da concentração. Os dados obtidos podem ser úteis em análises e otimização de processos de transferência de calor e massa contendo o leite e soro de búfala.

Palavras-chave: bubalino, composição centesimal, reologia, temperatura

ABSTRACT

SILVA, L.T.S. **Thermophysical Properties and Rheological Behavior of Buffalo milk and Whey**. Itapetinga–BA: UESB, 2014. 65p. (Dissertation–Master in Food Engineering).

Thermophysical characterization data, food rheological and physical-chemical products fluids are essential both for the design and equipment design to the industrialization of food , as well as to act as the quality of the material and its processing indicators. In this context, this work provided , for milk and whey buffalo dehydrated by lyophilization , evaluated data : (i) characterization by means of physical -chemical and chemical composition ; (ii) thermophysical properties of the specific heat , thermal diffusivity , density, thermal conductivity and whose total solids varied (5 , 20, 35, 50 , 65 and 80) % and temperature between (5 , 20, 35, 50 65 , 80 and 95) ° C; and (iii) the rheological behavior of the fluids with total solids content of 5 % , 20 % , 35 % and 50% in the range between (15, 25, 35 , 45, 55 and 65) ° C. The values found in this study for the physicochemical characterization were present in the literature range for milk and whey buffalo fresh. An increase of the density of the fluids with reduced water content and a consequent increase the solids content. The specific heat of the samples decreased with increasing concentration. The thermal diffusivity reduced proportionally with the reduction of the moisture content. It was observed increase of conductivity with increasing temperature. Showed an increase in apparent viscosity of the milk and whey with increasing concentration. The data obtained may be useful for analysis and optimization of heat and mass transfer processes containing milk whey and buffalo.

Keywords: buffalo, chemical composition, rheology, temperature

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Modelos reológicos utilizados nos ajustes das curvas de escoamento	23
Tabela 2. Caracterização físico-química do leite e do soro de búfala	34
Tabela 3. Valores experimentais da massa específica do leite de búfala	36
Tabela 4. Valores experimentais da massa específica do soro de búfala	37
Tabela 5. Valores experimentais do calor específico do leite de búfala.....	39
Tabela 6. Valores experimentais do calor específico do soro de búfala.....	40
Tabela 7. Valores experimentais do calor específico do leite de búfala.....	42
Tabela 8. Valores experimentais do calor específico do leite de búfala.....	43
Tabela 9. Valores experimentais da condutividade térmica do leite de búfala	45
Tabela 10. Valores experimentais da condutividade térmica do soro de búfala	46
Tabela 11. Coeficientes de determinação do ajuste do modelo da Lei de Potência correspondentes aos reogramas (Figuras 10, 11, 12 e 13).....	48
Tabela 12. Valores experimentais médios da viscosidade aparente de leite de búfala.....	50-51
Tabela 13. Valores experimentais médios da viscosidade aparente de soro de búfala	51
Tabela 14. Valores da Energia de Ativação para as viscosidades em rotações máxima média e mínima	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma: Obtenção e Preparo das Amostras	28
Figura 2. Variação da massa específica do leite de búfala com a temperatura e o teor de sólidos	38
Figura 3. Variação da massa específica do soro de búfala com a temperatura e o teor de sólidos	38
Figura 4. Variação do calor específico do leite de búfala com a temperatura e o teor de sólidos	41
Figura 5. Variação do calor específico do soro de búfala com a temperatura e o teor de sólidos	42
Figura 6. Variação da difusividade térmica do leite de búfala com a temperatura e o teor de sólidos	43
Figura 7. Variações da difusividade térmica do soro de búfala com a temperatura e o teor de sólidos	44
Figura 8. Variação da condutividade térmica do leite de búfala com a temperatura e o teor de sólidos	46
Figura 9. Variação da condutividade térmica do soro de búfala com a temperatura e o teor de sólidos	47
Figura 10. Reograma do leite de búfala com 5% de sólidos nas temperaturas 288k, 298k, 308k, 318k, 328k, 338k	49
Figura 11. Reograma do leite de búfala com 20% de sólidos nas temperaturas 288k, 298k, 308k, 318k, 328k, 338k	49
Figura 12. Reograma do leite de búfala com 35% de sólidos nas temperaturas 288k, 298k, 308k, 318k, 328k, 338k	49
Figura 13. Reograma do leite de búfala com 50% de sólidos nas temperaturas 288k, 298k, 308k, 318k, 328k, 338k	49
Figura 14. Variação da viscosidade aparente com a temperatura para soro de búfala com 5% de sólidos totais	52
Figura 15. Variação da viscosidade aparente com a temperatura para soro de búfala com 20% de sólidos totais	52
Figura 16. Efeito combinado do teor de sólidos e da temperatura sobre a viscosidade aparente do leite bubalino	53

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Ti	Temperatura inicial (°C)
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
R	Constante universal dos gases (J/mol.k)
E _{at}	Energia de ativação para viscosidade (kcal.gmol ⁻¹)
η ₀	Fator pré-exponencial (Pa.s)
μ	Viscosidade (Pa.s)
μ _{ap}	Viscosidade aparente (Pa.s)
K	Kelvin
G	Gramma
Kg	Quilograma
°D	Graus Dornic
m ³	Metro cúbico
S	Teor de sólidos
Rpm	Rotação por minuto
cP	Centipoise
R ²	Coeficiente de Determinação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1. Leite de Búfala	17
2.2. Soro de Leite de Búfala.....	17
2.3. Propriedades Termofísicas	18
2.3.1. Calor Específico	19
2.3.2. Difusividade Térmica.....	19
2.3.3. Massa Específica.....	20
2.3.4. Condutividade Térmica.....	21
2.4. Reologia	22
2.4.2. Modelos Reológicos.....	25
2.4.3. Efeito da Temperatura e da Concentração sobre o Comportamento Reológico..	27
3. MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1. Obtenção e Preparo da Matéria Prima.....	30
3.2. Análises Físico-químicas do Leite e do Soro	32
3.2.1. pH.....	32
3.2.2. Acidez Titulável Total.....	32
3.2.3. Umidade (% bu)	32
3.2.4. Cinzas	33
3.2.5. Atividade de Água.....	33
3.2.6. Proteínas	33
3.2.7. Lipídios	34
3.2.8. Extrato Seco Total e Desengordurado.....	34
3.2.9. Lactose	34
3.3. Determinação das Propriedades Termofísicas	35
3.3.1. Planejamento Experimental e Análises Estatísticas	35
3.3.2. Determinação da Massa Específica.....	36
3.3.3. Determinação do Calor Específico, Difusividade Térmica e Condutividade Térmica	36
3.4. Caracterização do Comportamento Reológico.....	36

4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1.	Caracterização Físico-química	37
4.2.	Propriedades Termofísicas	39
4.2.1.	Massa Específica	39
4.2.2.	Calor Específico	42
4.2.3.	Difusividade Térmica	45
4.2.4.	Condutividade Térmica	47
4.3.	Comportamento Reológico	50
4.3.1.	Efeito Combinado da Temperatura e da Concentração	56
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1. INTRODUÇÃO

A importância da ciência e da tecnologia de alimentos na melhoria da qualidade de vida do ser humano é destacada pela crescente busca por alimentos saudáveis, com alto valor nutricional, disponíveis e de fácil acesso a população. Com isso, a procura por fontes alternativas de alimentos tem sido tópico de inúmeras pesquisas nas últimas décadas. Nesse contexto, o leite de búfala tem se tornado promissor, pois, apresenta elevado valor nutritivo devido aos altos níveis de gordura, proteínas e minerais.

A utilização do leite de búfala na preparação de derivados tem sido pesquisada em diferentes regiões do mundo, destacando-se alguns tipos de queijos, iogurte e outros leites fermentados. A produção de um dos principais derivados desse leite, a *mozzarella*, implica na geração direta de elevados volumes de soro. Subproduto altamente rico em nutrientes, como carboidratos, proteínas, sais e vitaminas que, na maioria das vezes é descartado por falta de destinação adequada. No intuito de resolver esse problema de desperdício diversas indústrias de laticínios têm buscado algumas formas de utilização do soro de leite, tais como a formulação de novos produtos, a partir de sua aplicação na forma líquida, como, por exemplo, a bebida láctea (ARAÚJO et al., 2012).

Para a elaboração desses produtos a base de soro de leite, existe a necessidade da aplicação de processos que envolvem transferência de calor. Nestes processos a temperatura e a composição podem sofrer variações significativas, mudando as propriedades físicas e químicas do leite (GUIMARÃES et al., 2009).

O conhecimento das propriedades físicas, como massa específica, calor específico, difusividade e condutividade térmica, se torna, então, essencial para o dimensionamento dos equipamentos utilizados nos processos mencionados tanto em altas como em baixas temperaturas. Estas informações são úteis para se estimar o tempo de processamento e a quantidade de energia envolvida durante o processo.

Além das propriedades citadas, importância deve ser dada também ao comportamento reológico dos alimentos, pois seus dados são considerados uma ferramenta analítica, que fornece uma melhor compreensão da organização estrutural dos alimentos, sendo também importante para os cálculos em engenharia de processos, abrangendo equipamentos como agitadores, trocadores de calor, bombas, homogeneizadores e tubulações. O conhecimento do comportamento reológico é fundamental também para determinar a funcionalidade de ingredientes em novos produtos, para o controle de qualidade final ou intermediário e para a avaliação da textura pela correlação com dados sensoriais (STEFFE, 1996). O objetivo desse

trabalho foi caracterizar o leite e o soro bubalino, determinando-se quantitativamente pH, acidez total titulável, sólidos solúveis, umidade, cinzas, atividade de água, proteína, lipídios, extrato seco total e desengordurado e lactose. Também se objetivou avaliar as propriedades termofísicas essenciais no processamento do leite e do soro: calor específico, difusividade térmica, massa específica, e condutividade térmica e avaliar o comportamento reológico desses fluidos, em função da temperatura e do teor de sólidos totais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A criação de búfalos é originária da Ásia, onde foram domesticados há cerca de 7000 anos (GARCIA et al., 2005). Os búfalos domésticos pertencem à família *Bovidae*, subfamília *bovinae*, espécie *Bubalus bubalis*, com três subespécies: *bubalis*, na qual estão incluídas as raças Murrah, Jafarabadi e Mediterrâneo; *kerebao*, que agrupa a raça Carabao e a *Fulvus* que inclui o tipo Baio (MARQUES et al., 1997; SILVA et al., 2003).

Somente no final do século XIX a bubalinocultura foi introduzida no Brasil, pelo Dr. Vicente Chermant de Miranda, o qual comprou búfalos carabao. Em 1895 foi realizada outra importação de búfalos italianos e em 1952, outra leva de búfalos veio para o Brasil, vindos da Itália e da Índia (PIMENTEL et al., 2010), fortalecendo ainda mais a criação no país. Atualmente quatro raças são criadas no Brasil para a produção de carne e leite, sendo reconhecidas oficialmente pela Associação Brasileira de Criadores de Búfalos - ABCB: Carabao, Jafarabadi, Mediterrâneo e Murrah, e, com exceção da raça Mediterrâneo, todas as demais são de origem asiática.

A bubalinocultura brasileira vem apresentando elevado crescimento nas últimas décadas, evidenciado pelo aumento populacional desses animais em diversas propriedades e regiões, tanto na produção de leite e abate quanto na comercialização de matrizes e reprodutores (RODRIGUES et al., 2008). Isso se deu pelo fato dos búfalos serem animais que apresentam alta rusticidade, resistência a doenças e apresentarem também a capacidade de produzir proteínas de alto valor (carne e leite) a partir de alimentos fibrosos.

A lactação desses animais apresenta um período de 09 meses e sua fertilidade é também grande diferencial da espécie, pois os índices de parição são superiores a 80%, podendo chegar a quase totalidade das fêmeas quando estas são bem alimentadas e é realizado o correto manejo reprodutivo.

Outro ponto importante é a baixa taxa de mortalidade, tanto em animais jovens como em adultos, bem como a alta longevidade que faz com que o bubalino possa atingir os 30 anos de idade, sendo fértil, até os vinte anos de idade. Entretanto, é importante ressaltar que o bom manejo é fundamental para o sucesso de uma criação de búfalos. Os Búfalos são bastante dóceis, capazes de reconhecer as pessoas que lhes tratam e só se tornam agressivos quando mal conduzidos, ou, em casos raros, logo após a parição, com o intuito de proteger o filhote (SILVA, 2003).

2.1. Leite de Búfala

O leite de búfala apresenta características que o diferenciam de qualquer outro tipo de leite. Seus valores de sólidos totais, proteínas, lipídeos, resíduo mineral fixo e lactose, são de grande importância nutricional, principalmente para crianças e adultos. Entretanto, a sua composição pode ser influenciada por diversos fatores tais como raça, estágio de lactação, idade, manejo, sanidade, condições climáticas e alimentação (HUHN et al., 1986).

A ausência do β -caroteno na composição química do leite de búfala é uma de suas características mais marcantes, conferindo-lhe coloração branca. É importante ressaltar que a ausência dessa substância, não é considerada um problema nutricional, apesar deste alimento ser considerado um precursor de vitamina A, visto que o mesmo é rico nesta vitamina.

O leite de búfala apresenta maior teor de sólidos que o leite bovino, apresentando assim menos água e mais matéria seca. Outra característica importante é que possui um sabor bem adocicado, apesar de não possuir mais lactose que o leite bovino (MACEDO et al., 2001).

De acordo com Ménard et al. (2010), do ponto de vista tecnológico, o leite de búfala pode prover uma variedade de produtos como: manteiga, queijos frescos e maturados, leite condensado, leite em pó, sovetes, iogurtes e creme de leite. Para indústria de lácteos seu aproveitamento é superior, chegando comparativamente a sobrepujar o rendimento do leite bovino em mais de 40% (ANDRADE et al., 2011).

2.2. Soro de Leite de Búfala

O soro ou lactosoro é um subproduto resultante da separação das caseínas e da gordura do leite no processo de elaboração do queijo. Antigamente, era considerado como um líquido residual inaproveitável ou utilizado para alimentação animal. Contudo, o conhecimento de sua composição e os avanços tecnológicos evidenciaram que o soro é uma fonte importante de componentes lácteos de grande valor para indústria alimentícia e farmacêutica (ORDOÑEZ, 2005).

O soro representa 85% a 95% do volume total do leite e retém 55% dos nutrientes após coagulação da caseína no processamento do queijo. O mais abundante dos nutrientes encontrados é a lactose, seguido de proteínas solúveis, minerais e lipídeos o que corresponde um total de 8 a 10% de extrato seco. O soro contém ainda quantidades consideráveis de outros componentes como o ácido láctico, ácido cítrico,

compostos nitrogenados não proteicos e vitaminas do grupo B (GONZÁLEZ SISO, 1996).

Segundo a ABIQ (Associação Brasileira das Indústrias de Queijo), em 2006, a produção de queijo no Brasil ficou em torno de 580.000 toneladas. Estima-se que para cada quilo de queijo são produzidos 9 litros de soro e, considerando a produção brasileira de queijos, mais de 5.220.000 toneladas de soro foram obtidas.

No Brasil, alguns laticínios ainda lançam soro de leite em cursos d'água. Essa prática é considerada ilegal para resolver os problemas decorrentes de sua eliminação, pois, do ponto de vista biológico, o soro é um dos resíduos mais poluentes. A gravidade da poluição provocada pelo soro lácteo vem do fato de que ele apresenta uma Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) muito elevada. A DBO de um litro de soro varia de 30.000 a 60.000 mg/L. Outro dado que demonstra o potencial poluidor deste efluente é o fato de que ele pode ser aproximadamente cem vezes mais poluidor do que o esgoto doméstico (CAPITANI et al., 2005).

Para os laticínios, a conversão do soro líquido em bebidas fermentadas para consumo humano é uma das mais atrativas opções, devido à simplicidade do processo e utilização dos mesmos equipamentos de beneficiamento do leite, além de minimizar os problemas com descarte desse resíduo. Os produtos de soro não só permitem ao fabricante reduzir o custo total dos ingredientes como também apresentam a vantagem de possuir propriedades funcionais excepcionais e de ser uma fonte concentrada de nutrientes lácteos (GAUCHE et al., 2008).

2.3. Propriedades Termofísicas

Em tratamentos térmicos, tais como a pasteurização, concentração, secagem e refrigeração, para o qual o leite é frequentemente sujeito, o conhecimento específico das propriedades termofísicas envolvidas é importante. Falhas em equipamentos ou no projeto desses processos podem ser atribuídas à falta dessas informações quando da seleção de valores de propriedades termofísicas usadas na análise inicial dos sistemas em estudo. O tamanho do equipamento é normalmente superestimado levando a um dimensionamento incorreto. As consequências são implicações de custo e qualidade inferior do produto final (MOHSENIN, 1980). Desta forma, para as matérias-primas destinadas à industrialização, que estão sujeitas aos processos de aquecimento e resfriamento como, por exemplo, o leite e o soro de búfala, é interessante que se determine suas propriedades termofísicas (QUEIROZ e FIGUEIREDO, 2004).

Propriedades termofísicas, como a massa específica, o calor específico, a difusividade e a condutividade térmica, são muito utilizadas nos projetos de bombas, trocadores de calor, evaporadores, misturadores e em simulações de processos térmicos (MERCALI et al., 2011). Assim, faz-se necessária tanto a obtenção de dados precisos dessas propriedades quanto à predição do seu comportamento durante o processo, em função da temperatura e da composição (BRAYAN et al., 1999).

2.3.1. Calor Específico

O calor específico (c , com unidade no SI J/kg.K) - é uma medida da energia necessária para alterar a temperatura de um alimento em um grau, em uma unidade de massa, sem mudança de estado. Trata-se de um importante parâmetro termodinâmico para determinação da quantidade de energia a ser adicionada ou removida em processos de aquecimento e resfriamento, indicando o gasto energético, o que em um processo contínuo, tenderá a influenciar o tamanho do equipamento (ARAÚJO et al., 2004). Esta grandeza pode ser referenciada à pressão constante (C_p), e a volume constante (C_v), sendo estes os chamados de “calores específicos principais” (ALVARADO, 2001).

O calor específico dos alimentos é afetado significativamente pela quantidade de água presente e pelo estado físico da mesma, como também pela composição e estrutura do material (SINGH e HELDMAN, 1993). Os alimentos congelados com alto teor de água, por exemplo, podem ter valores para o calor específico aproximadamente igual à metade dos correspondentes em seu estado fresco (LEWIS, 1993).

Vários métodos têm sido utilizados para medir o calor específico. Os métodos de calorimetria diferencial de varredura (DSC) e técnicas de misturas são comumente utilizados (RAHMAN, 2009).

Entretanto, o calor específico pode ser medido também pelo método da sonda quente em regime transiente (VAN GELDER, 1998), utilizando, por exemplo, o aparelho KD2 Pro, que é um analisador automático de propriedades térmicas. As vantagens do aparelho é que a medição é rápida e necessita de pequena amostra do alimento.

2.3.2. Difusividade Térmica

A difusividade térmica (α , com unidade no SI m^2/s) de um meio ou produto está relacionada à propagação de calor no mesmo, durante as variações de temperatura com o tempo (PINHEIRO, 2004), ou seja, é a relação entre a capacidade do material de

transportar calor e sua capacidade de armazená-lo, sendo a mais utilizada das propriedades térmicas quando ocorre a transferência de calor em regime transiente (ARAÚJO et al., 2004). Esta propriedade é requerida para estabelecer a rapidez que o calor se difunde no alimento e conhecer as relações de tempo-temperatura que podem causar mudanças de nutrientes, texturas etc. (SILVA, 1997).

Materiais com alto valor de difusividade térmica respondem rapidamente a mudanças térmicas em seu ambiente, enquanto matérias de pequenos valores de difusividade respondem mais lentamente, demorando em alcançar um novo estado de equilíbrio (INCROPERA e DEWITT, 2003). Esta propriedade pode ser influenciada pelo conteúdo de água, temperatura, composição e porosidade.

A difusividade térmica de produtos lácteos é, em geral, determinada a partir do conhecimento do calor específico, densidade e condutividade térmica. Entretanto, os valores desta propriedade podem ser medidos diretamente pelo método da sonda quente em regime transiente, utilizando, o aparelho KD2 Pro (MOURA, 2001; ARAÚJO et al., 2004).

2.3.3. Massa Específica

Massa específica ou densidade (ρ) é definida como massa (kg) de um material por unidade de volume (m^3) e expressa em kg/m^3 no Sistema Internacional de unidade. Por se tratar de uma razão massa x volume, de modo geral, sólidos possuem densidade maior que líquidos, que por sua vez, maiores que de gases (SINGH e HELDMAN, 2009).

Atualmente, para a simulação de processos, há a necessidade da quantificação das mudanças da massa específica do alimento durante o seu processamento. Em operações como secagem, evaporação, agitação, resfriamento e cozimento ocorrem transferências simultâneas de calor e massa. Tais fenômenos provocam variações nos volumes dos alimentos, tanto de contração, devido à perda de umidade, como de expansão devido à dilatação de gases e/ ou líquidos ou à formação de poros no material, transformando a sua massa (MOURA, 2005). A massa específica de um fluido também é importante para a determinação da pressão exercida por uma coluna do mesmo, o que é imprescindível para o projeto de tanques de armazenagem e sistemas de bombeamento. Além disso, por meio da variação da massa específica de um fluido em um processo, pode-se determinar se o mesmo é compressível ou incompressível, o que resulta em abordagens bastante distintas do processo (RAHMAN, 2005). A massa

específica pode ser medida por vários aparelhos, como os picnômetros e os densímetros convencionais e digitais, sendo o picnômetro o mais utilizado. Sua maior utilização está relacionada com a alta precisão de análise. Os picnômetros são construídos e graduados de modo a permitir a pesagem de volumes exatamente iguais de líquidos a uma dada temperatura (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008).

Minin et al. (2002) estudaram o efeito da temperatura e da composição na densidade e viscosidade de leite bovino e constataram que os valores da densidade aumentaram à medida que o teor de proteína, lactose e minerais se elevou; e diminuíram quando o teor de umidade e gordura eram aumentados.

2.3.4. Condutividade Térmica

A condutividade térmica (k , com unidade no SI W/m. K) é definida como a constante de proporcionalidade que relaciona a taxa de transferência de calor por um material com a área de transferência de calor e a variação de temperatura com a distância no material (INCROPERA e DEWITT 2003), podendo ser entendida como a capacidade de um material em conduzir calor (ARAÚJO et al., 2004).

Nos alimentos a condutividade térmica depende tanto da sua composição como de qualquer fator que afeta o fluxo de calor ao longo do material, tais como percentual de espaços vazios, formato, tamanho e distribuição dos espaços vazios e de sua homogeneidade (SILVA, 1997). A sua relação com o conteúdo de água é uma das mais importantes propriedades de transporte requeridas para modelar processos em que massa e energia são trocados (PINHEIRO, 2004).

Atualmente, existem vários métodos de se medir a condutividade térmica dos materiais. Estes métodos podem ser classificados em métodos de estado estacionário e métodos de estado não estacionário. Os métodos estacionários são mais fáceis de serem realizados, entretanto, demandam relativamente grande quantidade de tempo para que seja atingido o regime estacionário para a realização da análise (MOURA, 2003). As metodologias baseadas no estado transiente (não estacionário), apesar de serem mais difíceis de realizar, são mais adequadas para alimentos, pois as medições são realizadas em poucos minutos, evitando assim alterações na amostra em consequência de sua atividade microbiológica e ou química, já que estes materiais são de natureza biológica (FONTANA et al., 1999). Dentre as metodologias baseadas no regime transiente podemos citar a medida direta pelo método da sonda quente através do aparelho KD2 Pro (ARAÚJO et al., 2004).

A condutividade térmica de um produto é uma das suas propriedades mais significativas em relação à transferência de calor (CARSON, 2006; SUOR, 1986). Esta propriedade é importante para prever e controlar as mudanças que ocorrem no leite durante processamento. Além de ser a propriedade mais influente durante a pasteurização, sendo altamente dependente da composição do leite e da temperatura utilizada no processo.

2.4.Reologia

O termo reologia foi criado como derivação do termo grego “rheos” que significa fluir. A reologia é o estudo do escoamento e deformação dos materiais e esta definição foi aceita desde a criação da Sociedade Americana de Reologia em 1929 (EGAWA, 2007). Os dados reológicos nas indústrias de alimentos são importantes para determinar a funcionalidade de ingredientes no desenvolvimento de produtos, controle de qualidade do produto final ou intermediário, determinação da vida de prateleira, avaliação da textura pela correlação com dados sensoriais, cálculo de engenharias de processos englobando uma grande quantidade de equipamentos, tais como: agitadores, extrusoras, bombas, trocadores de calor, tubulações ou homogeneizadores (LANNES et al., 2002).

Na reologia de sólidos, a propriedade de maior interesse é a elasticidade, ao passo que, em líquidos, a viscosidade é a propriedade física dos fluídos que caracterizam a sua resistência ao escoamento (PARK; LEITE, 2011). A viscosidade é a propriedade física de um líquido de resistir ao fluxo induzido pela tensão aplicada (cisalhamento). Ela é dependente da natureza físico-química da substância, da temperatura, da pressão, da taxa de cisalhamento e do tempo e para definir a viscosidade em função de um desses fatores os outros devem ser mantidos constantes e bem definidos (CASTRO, 2007).

O comportamento de um alimento durante o seu processo pode variar significativamente, pois a consistência e a composição do material podem ser alteradas devido a etapas de mistura, aquecimento, resfriamento, homogeneização, aeração, fermentação, cristalização, contribuindo, portanto, na modificação da viscosidade (LEWIS, 1993; BHATTACHARYA, 1998).

A viscosidade do fluido não é uma propriedade que pode ser medida diretamente, portanto a força, o torque e a rotação a que o fluido está submetido é que fornecem o valor da viscosidade e essa pode ser aferida através de equipamentos, sendo

que os mais comuns são os de sistemas capilares e os de sistemas rotacionais (VRIESMAN, 2008).

O comportamento reológico dos produtos lácteos pode ser bastante diverso, dependendo da sua composição, microestrutura, e condições de processamento. O leite muitas vezes exhibe comportamento newtoniano, entretanto o leite concentrado apresenta comportamento pseudoplástico; manteiga e leite condensado comportamento viscoelásticos, e iogurte e sorvete apresentam comportamento tixotrópico (dependente do tempo) (VÉLEZ-RUIZ; BARBOSA-CANOVAS, 1997).

2.4.1. Classificação dos Fluidos

Os fluidos são classificados de acordo com seu comportamento reológico por meio da análise da relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação para condições de temperatura e pressão estabelecidas. Reologicamente os fluidos são divididos em duas categorias: newtonianos e não-newtonianos (STEFFE, 1996).

O corpo viscoso mais simples é o fluido newtoniano, para o qual a relação existente entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento resulta numa constante (CASTRO, 2001). Muitos alimentos, como leite, suco de maçã, suco de laranja, água, vinho, cerveja e óleo vegetal exibem comportamento newtoniano (SHARMA et al., 2000).

Por outro lado os materiais não newtonianos podem ser classificados em dois grupos (Egawa, 2007), independentes do tempo e dependentes do tempo. Os fluidos independentes do tempo são divididos em dilatantes, pseudoplásticos e plásticos de Bingham.

O comportamento dilatante é caracterizado pelo aumento da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento, provocando ruptura da estrutura e a quantidade de líquido não é mais suficiente para a lubrificação, logo o atrito aumenta. Esse comportamento é explicado supondo-se o fluido constituído de partículas densamente empacotadas, com pequenos espaços intersticiais cheios de líquidos (CHHABRA; RICHARDSON, 2008). O comportamento dilatante é raramente encontrado na indústria de alimentos e extremamente raro em produtos alimentares acabados (BOURNE, 2002), tendo sido reportado em suspensões de goma de amido, mel de abelha e xaropes de chocolate.

Segundo Diniz (2009), no comportamento pseudoplástico a viscosidade aparente

o fluido é dependente da tensão de cisalhamento, demonstrando um decréscimo na viscosidade quando há um aumento na tensão. Esses fluidos em repouso apresentam um estado desordenado e, quando submetidos a uma tensão de cisalhamento, suas moléculas tendem a se orientar na direção da força aplicada. Quanto maior a tensão aplicada, maior será a ordenação e, conseqüentemente, menor será a viscosidade aparente. Essa classe é representada por produtos como polpas e sucos concentrados de frutas, caldos de fermentação, melaço de cana, molhos para saladas e soluções de pectina (CHARM, 1963; HOLDSWORTH, 1971; VITALI; ROIG; RAO, 1974).

Segundo McClements (2007), o fluido de Bingham se comporta como um sólido sob condições estáticas. Certa quantidade de força deve ser aplicada antes que o fluxo seja induzido (tensão inicial). Alguns exemplos de fluidos alimentícios que representam esse comportamento são: molhos de tomate, maionese, clara de ovo batida, ketchup, creme de chantilly e margarina (HAMINIUK, 2005). A maioria dos alimentos se enquadra nessa classificação.

Os fluídos não-newtonianos dependentes do tempo podem ser do tipo tixotrópicos e reopéticos. Um fluido tixotrópico é aquele no qual o valor da viscosidade diminui com o aumento da concentração. Exemplos desse fluido são gelatinas, clara de ovo, leite condensado açucarado, maionese, cremes, manteigas, molhos para saladas, suco de maçã com polpas, sucos concentrados de maracujá e laranja (CHOI e YOO, 2004; VITALI; RAIG; RAO, 1977; RAO, 1986; SHARMA; RIZVI, 2000).

A tixotropia pode ser explicada como uma consequência da agregação das partículas em suspensão. Nestes sistemas, a interação entre partículas é um resultado da atração, decorrente da ação de forças de van der Waals, assim como de repulsão devido a efeitos eletrostáticos e estéricos. A estabilidade do sistema depende então da existência de uma barreira de energia potencial que impede as partículas de se aproximarem umas das outras. Assim, barreiras físicas relativamente fracas levam à formação de agregados. Quando a suspensão permanece em repouso, a agregação das partículas pode formar uma rede, de modo que a suspensão passa a desenvolver uma estrutura interna. Com o cisalhamento, as barreiras mais fracas entre as partículas são rompidas, ocorrendo o rompimento da rede (FERGUSON e KEMBLOWSKI, 1991). Assim, com o aumento no tamanho das partículas, a estrutura interna deve se fortalecer, de modo a ser mais resistente ao cisalhamento (levando um maior tempo para se romper), mostrando uma tixotropia mais acentuada. Para partículas excessivamente grandes, a estrutura interna que causaria a estabilização da estrutura passa a ser

insuficiente, levando à conseqüente redução da tixotropia do sistema, ou até mesmo a sedimentação das partículas grandes.

Fluidos reopéticos, por sua vez, são aqueles que apresentam um acréscimo na viscosidade do fluido com o aumento da taxa de deformação. Assim como os fluidos tixotrópicos, após o repouso, o fluido tende a retornar ao seu comportamento reológico inicial. Este tipo de comportamento não é comum em alimentos, mas pode ocorrer em soluções de amido altamente concentradas ou em casos de formação de estruturas como na preparação de “creme de chantilly” e de clara em neve (DINIZ, 2009).

Teo, Munro e Singh (2000) afirmam que a tixotropia de soluções de proteínas de soro é caracterizada pela quebra das ligações dissulfídicas e de Van der Waals, e pelas interações iônicas e hidrofóbicas existentes entre as partículas de proteínas. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Magenis et al. (2006) que observaram também comportamento dependente do tempo e irreversível em iogurte e iogurte adicionado de soro concentrado por ultrafiltração.

2.4.2. Modelos Reológicos

Os modelos reológicos são usados para melhor descrição do comportamento dos fluidos, permitindo relacionar as propriedades reológicas com outras grandezas, como concentração, pH e temperatura (VIDAL, 2000). Existem várias equações que descrevem o comportamento de um fluido, no entanto, um modelo geral que se aplique a todas as situações não existe.

O modelo reológico mais simples é o newtoniano, no entanto, a maioria dos alimentos, não apresenta esse tipo de comportamento e requer modelos mais complexos para sua caracterização (TABILO-MUNIZAGA; BARBOSA-CÁNOVAS, 2005). Na literatura existem muitos modelos reológicos propostos. A escolha do modelo a ser utilizado é uma função das características do fluido. O modelo é considerado apropriado para descrever tal comportamento quando este proporciona os melhores ajustes dos dados experimentais. De acordo com dados da literatura os modelos mais comumente utilizados são: Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), Herschel-Bulkley, Plástico de Bingham, Casson e Mizrahi-Berk, representados na Tabela 1.

Tabela 1. Modelos reológicos utilizados nos ajuste das curvas de escoamento.

Modelos	Equação	Parâmetros
Ostwald-de-Waele	$\tau = k(\dot{\gamma})^n$	k_{ip} n
Herschel-Bulkley	$\tau = \sigma_o + k_H (\dot{\gamma})^n$	k_{hb} n σ_o (Pa.s)
Casson	$\tau^{0,5} = k_{oc} + k_c (\dot{\gamma})^{0,5}$	k_{oc} k_c
Mizrahi-Berk	$\tau^{0,5} = k_{oH} + k_M(\dot{\gamma})^n$	k_{oh} n k_M
Plástico de Bingham	$\tau = \sigma_o + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$	μ_p σ_o

*onde τ é a tensão de cisalhamento; $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação; k_{ip} , k_{hb} , k_{mb} e k_c são os índices de consistência; $K_{0,hb}$, $K_{0,mb}$ e $K_{0,c}$ são constantes dos modelos e n_{ip} , n_{hb} e n_{mb} são os índices de comportamento reológico.

Fonte: Silva, 2008.

Um dos modelos mais estudados e de fácil aplicação é o modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência). A primeira equação da tabela 1 é a que representa esta Lei e define o índice do comportamento do fluido (n) como uma grandeza adimensional que indica fisicamente, o afastamento do fluido considerado do modelo newtoniano; e o índice de consistência (k) indica o grau de resistência do fluido diante do escoamento. O comportamento do fluido se apresenta como dilatante quando (n) for maior do que uma unidade e, quando menor que a unidade, o modelo descreve o comportamento de fluido pseudoplástico. Quando n for igual à unidade, o modelo representa um comportamento newtoniano, sendo $k = n_{\alpha}$. Esse modelo tem sido amplamente empregado para avaliar o comportamento reológico de água, leite, mel, suco de fruta clarificado.

No estudo da reologia de produtos lácteos, o modelo da lei da Potência é frequentemente aplicado para descrever as propriedades de fluxo de iogurtes (ABU-JDAYIL; MOHAMEED, 2002), iogurtes elaborados a partir de leite e soro concentrados por ultra filtração (MAGENIS et al., 2006) e bebidas lácteas (PENNA; SIVIERI; OLIVEIRA, 2001). Este modelo foi utilizado por Abu-Jdayil e Mohameed (2002) para determinar os índices de consistência e de comportamento de fluxo de iogurtes utilizando as curvas de viscosidade.

Abu-Jdayil (2003) e Abu-Jdayil e Mohameed (2002) também observaram comportamento pseudoplástico quando a viscosidade aparente diminuiu com o aumento da taxa de deformação em iogurtes naturais e em labneh (tipo de leite fermentado concentrado e dessorado), respectivamente.

O modelo de Herschel-Bulkley é usado para fluidos que só iniciam o processo

de escoamento quando a tensão de cisalhamento aplicada supera uma tensão inicial que é própria do material (VIDAL, 2000). A equação para o modelo de Herschel-Bulkley é da mesma forma que a equação do modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da potência), mas com a adição do termo de tensão inicial (τ_0), que significa que, para haver escoamento do fluido, se torna necessária a aplicação de uma força que consiga romper esta tensão inicial (BOURNE, 2002).

O modelo Plástico de Bingham é uma adaptação do modelo de Ostwald-de Waele para fluidos newtonianos. O que os difere é a presença de uma tensão de cisalhamento crítica. Esses materiais possuem uma estrutura interna capaz de impedir o escoamento para valores de tensão de cisalhamento inferiores a um valor limite (τ_0). Quando a tensão de cisalhamento é maior que o valor limite, a estrutura interna colapsa, favorecendo o escoamento do material como um fluido (SKELLAND, 1967).

O Modelo de Casson é similar ao modelo de Plástico de Bingham, pois ambos apresentam uma tensão de cisalhamento inicial. No entanto, os valores dos parâmetros do fluido são diferentes, dependendo dos limites dos dados da análise matemática. Comumente utilizado para descrever o estado estacionário de substâncias como sangue, iogurte, purê de tomate, chocolate, etc. (VITALI e RAO, 1984). É muito usado por ser simples e de fácil compreensão. Os valores de tensão inicial são, geralmente, extrapolações dos dados de tensão de cisalhamento e da taxa de deformação, ou seja, são parâmetros de ajuste estatístico e não propriedades de um material (BRANCO e GASPARETTO, 2005).

O Modelo de Mizrahi-Berk é uma modificação do modelo de Casson, no qual Mizrahi-Berk alteraram a equação original para descrever a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, em suco de laranja concentrado (RAO; RIZVI; DATTA, 2005). O desenvolvimento foi baseado no modelo de uma suspensão de partículas interagindo em um solvente pseudoplástico.

2.4.3. Efeito da Temperatura e da Concentração sobre o Comportamento Reológico

A temperatura é um dos fatores que mais afeta a viscosidade dos fluidos. Um aumento da temperatura faz com que a viscosidade da fase líquida diminua, aumentando o movimento das partículas em suspensão (PELEGRINE, 1999). Segundo Krokida et al. (2001), a temperatura tem maior efeito no índice de consistência (K) em fluidos alimentícios não-newtonianos, do que no índice de comportamento (n).

O efeito da temperatura na viscosidade aparente de fluidos alimentícios, a uma taxa de cisalhamento constante, pode ser descrita pela equação de Arrhenius (RAO e TATTIYAKUL, 1999), na qual a viscosidade aparente diminui em uma função exponencial com o aumento da temperatura. A equação de Arrhenius é apresentada na Equação (1) (STEFFE, 1996).

$$\eta_a = \eta_0 \exp(E_a \cdot RT) \quad (1)$$

Em que:

η_a é a viscosidade aparente (Pa.s);

η_0 é uma constante (Pa.s);

E_a é a energia de ativação para escoamento viscoso (kJ.gmol⁻¹);

R é a constante dos gases (0,008314 kJ.gmol⁻¹.K⁻¹);

T é a temperatura absoluta (K).

A Equação (1) indica a tendência geral observada da diminuição da viscosidade aparente com o aumento da temperatura. Em geral, uma alta energia de ativação de fluxo implica que pequenas variações de temperatura são necessárias para modificar rapidamente a viscosidade (STEFFE, 1996).

O conhecimento da energia de ativação (E_a) e o parâmetro de ajuste (η_0) permite modelar o comportamento reológico, bem como verificar os efeitos da temperatura sobre a viscosidade (GRATÃO; SILVEIRA JÚNIOR, 2004). A energia de ativação (E_a), segundo Pereira; Figueiredo (2003) indica a sensibilidade da viscosidade devido à mudança de temperatura, em que maiores valores da energia de ativação significam que a viscosidade é relativamente mais sensível à mudança de temperatura.

Outro fator que afeta os parâmetros reológicos de alimentos fluidos é a concentração. Para um fluido alimentício, o aumento da concentração comportará em aumento da viscosidade ou da viscosidade aparente ou índice de consistência a uma determinada taxa de deformação. Em faixas limitadas de concentração e a uma taxa de deformação e temperatura fixas, o efeito da concentração de sólidos na viscosidade aparente pode ser descrito por relações do tipo exponencial ou do tipo potência conforme as equações (2) e (3), respectivamente (SILVA et al., 2005).

$$\eta_a = K_1 \cdot (C)^{A_1} \quad (2)$$

$$\eta_a = K_2 \cdot \exp(A_2 \cdot C) \quad (3)$$

Em que: C é concentração de sólidos solúveis totais; A1, A2, K1 e K2 são constantes a serem determinadas.

Entretanto, torna-se de grande importância para a indústria de alimentos, obter uma única equação que relacione a viscosidade aparente do fluido com concentração e temperatura de trabalho, como também esse efeito combinado com a taxa de deformação, já que o comportamento do fluido do produto será influenciado de alguma maneira pela quantidade de transferência de movimento e de calor. Com esta finalidade, tem-se analisado diversas equações relatadas na literatura.

O efeito da temperatura e concentração sobre a viscosidade também pode combinar-se e duas Equações (4 e 5) são as mais aplicadas para descrever este efeito nos fluidos alimentícios (VITALI e RAO, 1984 ; IBÁRZ e SINTES, 1989; RAMOS, 1997):

$$\eta = a_1 \cdot C^{b_1} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

$$\eta = a_2 \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT} + b_2 C\right) \quad (5)$$

Em que: η é a viscosidade para os fluidos newtonianos e a viscosidade aparente para os fluidos não newtonianos.

Vélez-Ruiz e Barbosa-Cánovas (1998) estudaram o comportamento de concentrados de leite variando o teor de sólidos de 12,7% para 40,4%. O comportamento reológico foi representado por parâmetros correspondentes às equações da Lei da Potência e de Herschel-Bulkley, dependendo do teor de sólidos. A viscosidade (n) e o coeficiente de consistência (K) foram relacionados exponencialmente com a concentração do leite. O coeficiente de consistência seguiu a relação da temperatura através da equação Arrhenius e a energia de ativação variou 4,3-6,1 kcal/gmol. Estes dois parâmetros reológicos (n e K) mudaram com a concentração e temperatura.

Minin et al., (2002), relatam que a viscosidade do leite bovino diminuiu com o aumento da temperatura e da umidade.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1.Obtenção e Preparo da Matéria Prima

O leite e o soro bubalino foram doados pelo Laticínio Palmeira dos Índios, localizado na Fazenda Cabana da Ponte no município de Itororó na região Sudoeste da Bahia, localizada entre 15° 07' de Latitude Sul e 40° 04' de Longitude Oeste, com o clima variando de semiárido a úmido. As búfalas das quais foram provenientes as matérias primas são da raça Murrah, com idade média de 2,5 anos (30 meses) e período de lactação de sete meses. Após a coleta o leite e o soro foram transportados em recipientes devidamente higienizados e refrigerados (4°C) até o Campus da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia-UESB em Itapetinga-BA, onde foi filtrado e armazenado em freezer vertical (ELECTROLUX, FFE 24, Brasil) a -22°C. A etapa experimental de caracterização físico-química, determinação das propriedades termofísicas e reológicas foi realizada nos laboratórios do Centro de Desenvolvimento e Difusão de Tecnologias (CEDETEC) da UESB, campus de Itapetinga.

O leite e o soro de búfala foram então liofilizados (TERRONI, LV200, Brasil) visando aumentar a sua vida útil e reduzir a variabilidade do material a ser analisado posteriormente.

3.1.1. Secagem por Liofilização

A desidratação foi realizada em um liofilizador de bancada constituído por um condensador em aço inox com capacidade de 3/5 kg de gelo por ciclo e temperatura de -55°C; três plataformas para bandejas, com aquecimento; três bandejas em aço inox com área de 0,080 m² cada; uma bomba de vácuo, com capacidade de 120 µmHg ao final do processo; um painel em LCD que permite controlar todos os parâmetros requeridos para que aconteça a liofilização. A pressão na câmara de secagem, a temperatura do condensador, o tempo decorrido e a finalização do processo também são mostrados no painel.

Foram utilizados 300 g de cada amostra in natura distribuídos nas bandejas do liofilizador. Em seguida, as amostras nas bandejas foram congeladas em um ultra freezer (COLDLAB, CL 374-80 V, Brasil) a -80°C por 48 horas. Após o congelamento, as bandejas foram retiradas do freezer e colocadas imediatamente no liofilizador. Testes preliminares definiram: -35°C e 40°C, como as temperaturas adequadas para a secagem primária e secundária, respectivamente; trinta horas como o tempo da secagem primária; 15% da potência máxima como a potência para o aquecimento na secagem secundária.

O tempo total da etapa de liofilização (secagem primária e secundária) foi de 70 horas. Terminado o processo, o pó resultante da desidratação do leite e do soro foram removidos das bandejas e acondicionados em sacos de polietileno. A obtenção e preparo das amostras do leite e do soro estão descritos (Figura 1).

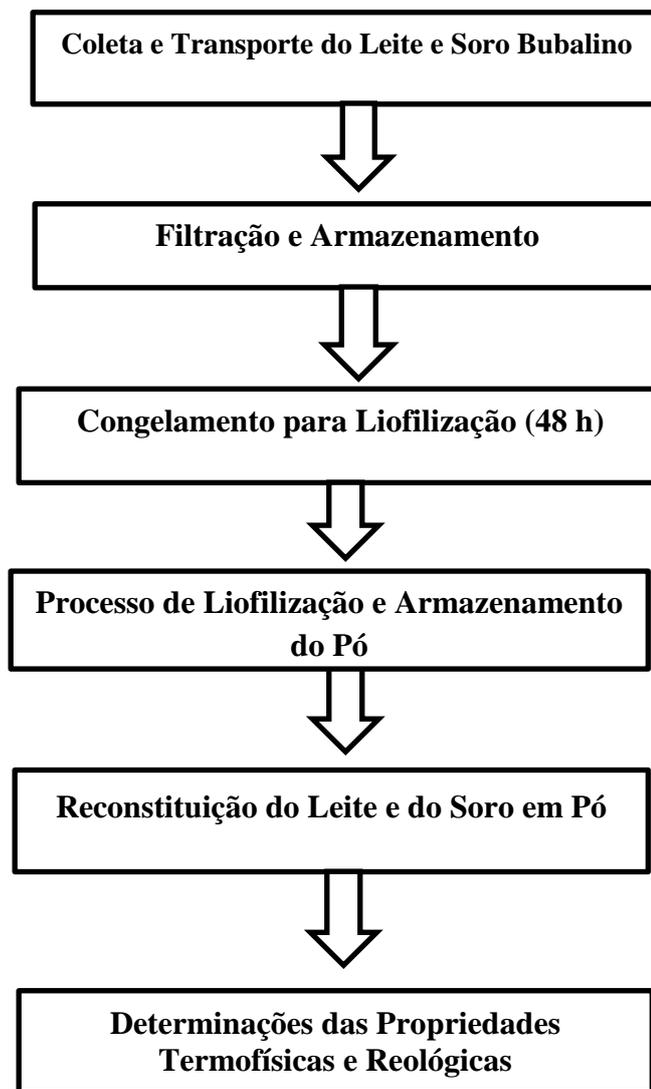


Figura 1. Fluxograma de Obtenção e Preparo das Amostras.

3.2. Análises Físico-químicas do Leite e do Soro

Todos os reagentes necessários às análises físico-químicas foram de grau analítico, as análises foram realizadas em triplicata e seguiram as metodologias descritas pelo (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008).

Para minimizar os efeitos de fatores ambientais e da raça do animal na composição do leite e conseqüentemente do soro, foi feito um *pool* de liofilizados, ou seja, amostras de leite e soro foram coletadas em todas as estações do ano, abrangendo também o estágio de lactação das búfalas. Após dispor das amostras de todos os períodos avaliados, estas eram misturadas com auxílio de um bastão de vidro, em béquer com capacidade para grande quantidade das amostras, para que fosse feita a reconstituição utilizando água destilada.

Todas as análises descritas a seguir foram realizadas para as amostras de leite e de soro, após a desidratação.

3.2.1. pH

A determinação do pH foi feita por medida direta nas amostras, utilizando um pHmetro digital (precisão $\pm 0,01$ pH, HANNA, HI 8424, Romênia) devidamente calibrado com soluções-tampão de pH 4,0 e 7,0.

3.2.2. Acidez Titulável Total

Para a determinação da acidez titulável total foram transferidos 10 mL das amostras (leite e soro, separadamente) para o béquer, adicionados 4 a 5 gotas da solução de fenolftaleína a 1 % e titulados com a solução Dornic, até aparecimento de coloração rósea persistente por aproximadamente 30 segundos.

Para a determinação da acidez foram feitos os cálculos:

$$\text{Acidez (}^\circ\text{Dornic)} = V \cdot f \cdot 10$$

Em que:

V = volume da solução de hidróxido de sódio 0,1 N gasto na titulação, em mL;

f = fator de correção da solução de hidróxido de sódio 0,11 N ou N/9.

10 = transformação de ácido láctico para grau Dornic.

3.2.3. Umidade (% bu)

O teor de água foi obtido pelo método gravimétrico determinando-se a diferença em relação à mostra inicial. A secagem foi feita em estufa (DELEO, TLK, 48) a 105°C,

sendo a primeira pesagem (BIOPRECISA, FA 2104 N, Brasil; precisão de 0,001g) após três horas de secagem e as demais a cada trinta minutos até peso constante, atingindo um tempo total de quatro horas e meia de secagem.

3.2.4. Cinzas

Para determinação do resíduo mineral fixo (cinzas), cadinhos de porcelana foram aquecidos a 550°C em forno mufla (FORNITEC, TRIF 3523, Brasil) durante 30 minutos. Em seguida, resfriados em dessecador e pesados. Pesou-se aproximadamente 5,00 gramas de cada amostra que foram carbonizadas em estufa a 105°C. As amostras foram incineradas dentro dos cadinhos por 3 horas ou até ter obtido cinzas totalmente brancas. Resfriou-se as amostras em dessecador e logo em seguida, realizou-se a pesagem.

Para a determinação das cinzas foram feitos os seguintes cálculos:

$$\text{Porcentagem de cinzas} = (m_2 - m_1) \cdot 100 m_o$$

Em que:

m_2 = massa do cadinho com amostra após incineração, em gramas;

m_1 = massa do cadinho vazio, em gramas;

m_o = massa da amostra, em gramas.

3.2.5. Atividade de Água

A atividade de água de cada amostra foi determinada utilizando-se o aparelho Aqualab-TE da Decagon Devices (Estados Unidos, com precisão de 0,003, na temperatura de 25°C). Este aparelho usa o método da temperatura do ponto de orvalho por resfriamento e condensação em espelho, para determinar a atividade de água.

3.2.6. Proteínas

A determinação das proteínas foi feita pelo método de Kjeldahl (1883) utilizando destilador de nitrogênio (SOLAB, SL 119, Brasil). Este método se baseia nas três etapas de determinação de nitrogênio: digestão, destilação e titulação. O conteúdo de nitrogênio das diferentes proteínas é de aproximadamente 16%, por isso usa-se um fator empírico de 6,25 para transformar a massa de nitrogênio encontrada em massa de proteína.

3.2.7. Lipídios

O conteúdo de lipídios foi determinado adicionando ao butirômetro 10 mL da solução de ácido sulfúrico e 11 mL de amostra (leite ou soro) homogeneizada em homogeneizador (ULTRA TURRAX, IKA T18, Alemanha) lentamente e pela parede deste, para evitar sua mistura com o ácido. Foi acrescentado 1 mL de álcool isoamílico. O butirômetro foi agitado de modo a promover a mistura completa dos líquidos no seu interior, tomando-se precauções para se evitar acidentes e mantendo-se o polegar sobre a tampa. A amostra foi centrifugada (ST LABOR, ST 701, Brasil) durante 5 minutos de 1000 a 1200 rpm e transferida para banho-maria a 65°C por 5 minutos. A leitura da porcentagem de gordura foi feita diretamente na escala do butirômetro e na base do menisco formado pela camada de gordura, imediatamente após retirá-lo do banho-maria.

3.2.8. Extrato Seco Total e Desengordurado

O extrato seco total foi determinado por meio da utilização de instrumento apropriado (disco de Ackermann, GERBER, Suíça) e usando os valores de densidade e do teor de gordura de cada amostra. Obteve-se a porcentagem de extrato seco desengordurado, subtraindo da porcentagem de extrato seco total a porcentagem de gordura das amostras.

3.2.9. Lactose

A determinação da lactose foi realizada pelo método de Fehling, transferindo-se, com auxílio de uma pipeta volumétrica, 10 mL das amostras (leite ou soro) para um balão volumétrico de 100 mL, adicionou-se 50 mL de água, 2 mL da solução de sulfato de zinco a 30% e 2 mL da solução de ferrocianeto de potássio a 15%, misturando bem com um bastão de vidro após cada adição. Deixou-se sedimentar durante 5 minutos, o volume foi completado com água, a mistura foi agitada e filtrada em papel de filtro (UNIFIL, 150 mm, Brasil) em um frasco Erlenmeyer de 300 mL. Em um balão de fundo chato de 300 mL, transferiu-se 10 mL de cada uma das soluções de Fehling e adicionou-se 40 mL de água, aquecendo até a ebulição em chapa aquecedora. O filtrado foi transferido para uma bureta de 25 mL e gotejado sobre a solução do balão em ebulição até a solução mudar da coloração azul para incolor e no fundo do balão ficar um resíduo vermelho-tijolo.

Cálculo da Lactose: $(V \cdot 0,068 \cdot 100) / (L \cdot v)$

Onde: 0,068 = massa de lactose (g) que corresponde a 10 mL da solução de Fehling;

v = volume (mL) da solução da amostra, gasto na titulação;

L = volume (mL) da amostra;

V = volume (mL) de diluição da amostra (100 mL).

3.3. Determinação das Propriedades Termofísicas

3.3.1. Planejamento Experimental e Análises Estatísticas

Para determinação das propriedades termofísicas foi realizado um experimento em esquema fatorial 7X6, para as temperaturas de (5, 20, 35, 50, 65, 80 e 95)°C e os teores de sólidos de (5, 20, 35, 50, 65 e 80)% no delineamento inteiramente casualizado. Para variar o conteúdo de sólidos, as amostras de leite e de soro com 96,36 % e 95,5% de sólidos totais, respectivamente, foram diluídas com água destilada até atingir a concentração desejada.

Os resultados referentes às propriedades termofísicas foram submetidos à análise de regressão múltipla, quando foram avaliados diversos modelos polinomiais. O modelo escolhido foi aquele que apresentou os parâmetros significativos a 5% de probabilidade, utilizando-se como critérios auxiliares o coeficiente de determinação e a concordância com o fenômeno estudado. Para realização das análises utilizou-se o pacote estatístico ORIGIN PRO 8.6.

Para a determinação do comportamento reológico das amostras de soro e leite bubalino, foi adotado um esquema fatorial 6X4, sendo as temperaturas para ambas as amostras de (15, 25, 35, 45, 55 e 65)°C, e os teores de sólidos totais de (5, 20, 35 e 50)% para as amostras de leite e de 5% e 20% para as amostras de soro, instalado em delineamento inteiramente casualizado. Para variar o teor de sólidos totais, as amostras com cerca de 95% de sólidos totais foram diluídas com água destilada até atingir as concentrações de sólidos totais desejadas. Em relação às propriedades reológicas foi avaliado, dentre outros, o modelo de regressão não linear de Ostwald-De-Waele (Lei da Potência). Para o modelo ser considerado adequado foi observado o coeficiente de determinação e a concordância com o fenômeno estudado. O modelo e os respectivos gráficos foram construídos utilizando o software do ORIGIN PRO 8.6.

3.3.2. Determinação da Massa Específica

A determinação da massa específica foi feita por meio do método picnométrico, em triplicata. Para cada temperatura de interesse, mantida constante utilizando-se um banho termostático (Marca Quimis – Modelo São Paulo, Brasil e precisão de 0,1°C), o picnômetro de 25 mL, lavado e seco foi pesado vazio em uma balança analítica (BIOPRECISA, FA 2104 N, Brasil; precisão de 0,001g), e sua massa devidamente registrada. Em seguida, o picnômetro foi preenchido com água destilada na temperatura de trabalho, e sua massa medida, obtendo dessa forma o volume exato do picnômetro (calibração). Em seguida, o mesmo era limpo como mencionado anteriormente e preenchido com as amostras nas concentrações e temperaturas de interesse e pesado em balança analítica, com sua massa devidamente registrada.

3.3.3. Determinação do Calor Específico, Difusividade Térmica e Condutividade Térmica

As propriedades: Calor Específico, Difusividade Térmica e Condutividade Térmica, foram medidas diretamente pelo método da sonda quente em regime transiente, utilizando-se o aparelho KD2 Pro (DECAGON DEVICES, 2365 NE, Estados Unidos).

3.4. Caracterização do Comportamento Reológico

As medidas reológicas foram realizadas em um reômetro Brookfield (modelo DVII Pro, Estados Unidos) utilizando rotores (*spindles*) SC4-18, LV1, LV2 com adaptador para uma quantidade média de amostra.

Para a realização das análises reológicas, utilizou-se, para cada medida, 60 mL de cada amostra. Variou-se a velocidade angular de 150 a 200 rpm no intervalo de 5 rpm, permanecendo durante 4 segundos em cada velocidade com controle de temperatura. Para cada velocidade angular selecionada, o equipamento determinou os parâmetros reológicos, utilizando-se o programa computacional Rheocalc (versão V2. 3, Brookfield Engineering Laboratories, EUA). Com os dados experimentais obtidos no reômetro em função do teor de sólidos e da temperatura, modelos matemáticos foram ajustados aos mesmos, para a obtenção dos parâmetros do modelo e conseqüentemente identificar o modelo mais adequado para descrever o comportamento reológico do leite e do soro bubalino.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização Físico-química

Os valores encontrados no presente estudo estão na faixa de dados da literatura para o leite de búfala *in natura* (Tabela 2). Verruma e Salgado (1993) obtiveram valores de 82,79% de umidade; 0,82% de cinzas; 7,3% de teor de gordura e 4,2% para proteínas. Este último foi superior ao valor apresentando neste trabalho (3,3%). Tal fato pode ser devido à composição do leite de búfala, que é variável conforme o período da lactação, a raça e a alimentação. Sendo que as matérias primas utilizadas neste trabalho, são de búfalas que possui selo de 100% orgânico, ou seja, a alimentação não é à base de rações e sim de pasto natural (braquiária). O teor de proteína também pode influenciar nos teores de sólidos totais, visto que, aproximadamente metade dos sólidos totais do leite, inclui proteínas solúveis, sais e principalmente lactose (PACHECO et al., 2005; CHAVES et al., 2010).

Tabela 2. Caracterização físico-química do leite e do soro de búfala.

ANÁLISES	RESULTADOS	
	Leite	Soro
Acidez (°D)	20,7	17,6
Gordura (%)*	7,5	0,2
Densidade (g/L) a 15°C	1,0333	1,0240
Extrato Seco Total (%)	17,23	6,07
Extrato Desengordurado (%)	9,73	5,87
Ph	6,69	6,45
Umidade (%)*	88,99	83,32
Cinzas (%)*	0,83	0,79
Lactose	4,70	3,59
Proteína (%) (m/m)*	3,30	2,49
Atividade de Água	0,99	0,99

*Porcentagem em massa / massa

Na mesma faixa de valores estão os resultados descritos em Brasil (1991), Ferrara (1975), Ganguli (1981): 7,4% e 9,6% para gordura; 3,3 a 5,9 % para lactose; 0,70 a 0,85% para cinzas. Amaral (2005), em estudos realizados em Minas Gerais, encontrou 6,85% para o teor de gordura e 4,93% para a lactose.

Observando-se os valores de pH, densidade e acidez determinados neste trabalho estão de acordo com dados encontrados na literatura, os quais demonstram que a acidez do leite de búfala pode variar entre 20 °D e 23 °D (NADER FILHO, 1996).

Nader Filho (1996) e Neves (1985) observaram, respectivamente, valores para a densidade do leite de 1,0325 e 1,037; e o pH das amostras variou de 6,41 a 6,97. Essas análises servem como indicadores de qualidade sanitária visando à importância desses testes. De acordo com Campos et al. (2011) o leite com carga microbiana elevada não passou por cuidados após a ordenha e um valor de pH alterado implica em acidez Dornic elevada.

Segundo o Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade de Soro de Leite, o soro de leite doce ou soro de leite, é o líquido obtido a partir da coagulação do leite destinado a fabricação de queijos, caseína ou produtos lácteos similares. A coagulação se produz principalmente por ação enzimática, devendo apresentar pH entre 6,0 e 6,8. Assim, pode-se considerar o soro usado como matéria prima no presente trabalho como sendo o soro doce, já que apresentou pH médio de 6,4. Este valor ligeiramente acima aos relatos de Teixeira e Fonseca (2008) e Lira et al. (2009) que encontraram valores de 6,25 e 6,29, respectivamente. Essa variação pode ocorrer em razão da ação bacteriana.

O teor médio de acidez titulável encontrado no soro foi de 17,6 °D semelhante ao determinado por Huhn et al. (1991), de 17 °D. No entanto, inferior ao descrito por Macedo et al. (2001), de 18,98 °D. As variações na acidez titulável podem estar relacionadas com o fornecimento aos animais de alimentos e minerais inapropriados, silagens de baixa qualidade, além de fatores ambientais. Conforme Oliveira et al. (2003), a acidez elevada no leite e no soro pode resultar da acidificação da lactose, decorrente da multiplicação de microrganismos deterioradores e/ou patogênicos.

O soro do leite bubalino também apresentou valores similares aos descritos por Venturoso et al. (2007), em estudos da composição físico-química de produtos lácteos, encontrou percentuais de 6,20 % para o extrato seco total, 0% para a gordura e 1,0270 para a densidade. No entanto, divergiram dos relatados por Lira et al. (2009): 89,94% de umidade, 1,37% de gordura, 1,19% de proteína e 5,84% de lactose. Pode-se relacionar esta pequena diferença na porcentagem dos componentes do soro à origem do soro trabalhado. Lira et al. (2009) usaram o soro bubalino obtido pelo método de microfiltração por membranas de cerâmica, enquanto que no presente trabalho foi utilizado o soro proveniente do processo de coagulação enzimática. Para fins de comparação com o soro de queijo bovino, Florentino et al. (2005) obtiveram resultados superiores ao desse estudo: 1,05% de gordura; 4,20% de lactose e 1,78% de proteína. No entanto, Teixeira e Fonseca (2008), descrevem resultados inferiores aos de Florentino et al. (2005): 0,68% de gordura e 0,80% de proteína. Santos e Ferreira

(2001), obtiveram: 0,30% de gordura; 0,90% de proteína e 5% de lactose.

A variação no teor de gordura pode ser explicada por ser o componente mais variável na constituição do leite, sendo diretamente influenciada pela padronização do leite utilizado como matéria-prima para produção de queijo, pelo rendimento do queijo e pelo próprio processamento (Teixeira e Fonseca, 2008). Adicionalmente, observa-se que os valores de proteínas observado no soro de vaca estão abaixo dos obtidos com o soro de búfala, o que comprova o elevado valor nutricional do soro bubalino, sendo considerado um produto de excelência para a elaboração de derivados lácteos.

4.2. Propriedades Termofísicas

4.2.1. Massa Específica

Os resultados das determinações da massa específica das amostras de leite de búfala para as diversas temperaturas e teores de sólidos são apresentados nas Tabelas 3. Os valores variaram de (893,21 a 1050,15) kg/m^3 para o leite.

Tabela 3. Valores experimentais da massa específica do leite de búfala.

Teor de sólidos (%)	5	20	35	50	65	80
T (K)						
		Massa Específica (kg/m^3)				
278	1001,42	1003,95	1006,96	1047,50	1049,59	1050,15
293	1001,50	1009,90	1012,76	1017,06	1019,71	1020,94
308	1005,75	1015,66	1034,35	1036,55	1037,01	1037,69
323	1005,96	1008,84	1024,46	1027,44	1035,30	1036,51
338	1004,53	1006,79	1034,26	1035,85	1039,37	1041,51
353	1004,57	1003,47	1034,48	1014,37	943,81	940,15
368	1001,25	1003,14	1034,42	1013,88	936,91	893,21

Os resultados das determinações da massa específica das amostras de soro de leite de búfala para as diversas temperaturas e teores de sólidos variaram de (893,21 a 1050,15) kg/m^3 (Tabela 4).

Tabela 4. Valores experimentais da massa específica do soro de búfala.

Teor de sólidos (%)	5	20	35	50	65	80
T (K)						
		Massa Específica (kg/m³)				
278	985,01	1041,07	1072,78	1088,54	1095,26	1124,14
293	1021,43	1038,36	1064,03	1086,14	1094,37	1122,22
308	1006,72	1034,56	1065,94	1078,41	1093,93	1121,11
323	1008,90	1030,31	1060,72	1078,79	1084,12	1100,05
338	1005,76	1025,23	1049,42	1076,62	1090,04	1092,88
353	1006,83	1037,64	1057,85	1077,36	1085,24	1117,94
368	1000,05	1018,29	1058,76	1104,14	1080,03	995,11

Segundo CHOI e OKOS (1986), existe certa dificuldade em mensurar a densidade em temperaturas superiores a 80K. Este fato foi verificado nos experimentos já que em temperaturas entre 80K e 95K houve redução acentuada da densidade, provavelmente devido a grande expansão térmica sofrida pelo leite e pelo soro em temperaturas elevadas, uma vez que a energia fornecida ao sistema faz com que suas moléculas vibrem com velocidades maiores, ficando cada vez mais afastadas umas das outras.

Determinar uma equação que descreva o efeito combinado da temperatura e da concentração sobre a variação da densidade é fundamental para a utilização em cálculos de engenharia. Assim sendo, o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais observados, tanto para as amostras de leite quanto para as de soro, foi um modelo do tipo polinomial de segundo grau, no qual a densidade varia com a temperatura e com a concentração.

As equações resultantes, com os respectivos valores dos coeficientes de determinação, e com as representações gráficas são mostradas nas Figuras 2 e 3, para a massa específica do leite e massa específica do soro, respectivamente.

$$\rho = -373,59 + 8,01T + 8,35S - 0,012T^2 - 0,016S^2 - 0,022TS \quad R^2 = 0,56 \quad (6)$$

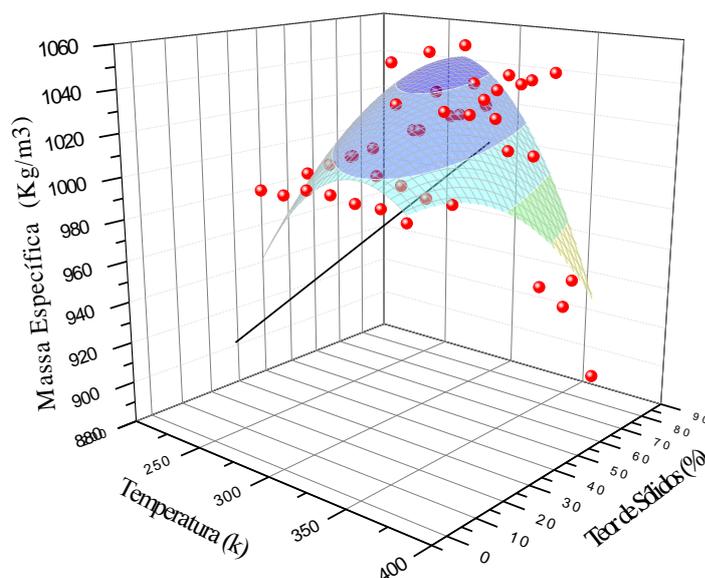


Figura 2. Variação da massa específica do leite de búfala com a temperatura e o teor de sólidos. ρ : densidade (kg/m^3); T: temperatura (K); S: Teor de sólidos (%).

$$\rho = 573,21 + 2,31T + 7,40S - 0,0032T^2 - 0,021S^2 - 0,014TS \quad R^2 = 0,79 \quad (7)$$

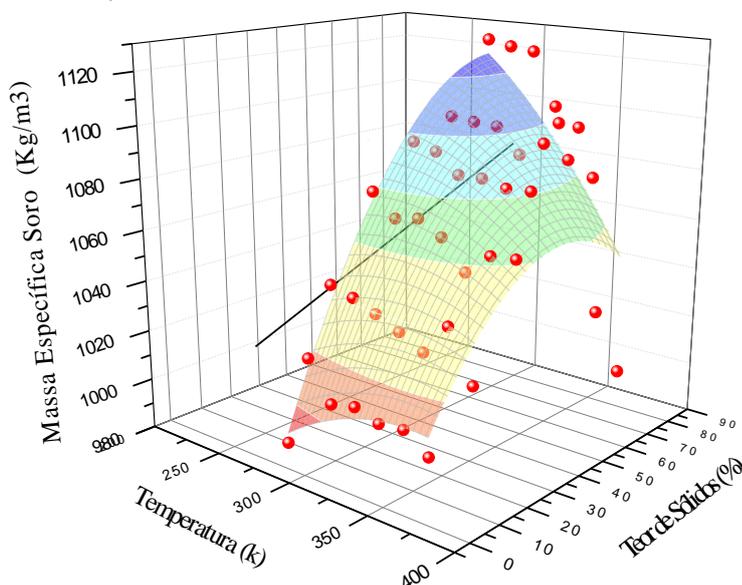


Figura 3. Variação da massa específica do soro de búfala com a temperatura e o teor de sólidos. ρ : densidade (kg/m^3); T: temperatura (K); S: Teor de sólidos (%).

O modelo polinomial de segundo grau foi o que melhor se ajustou, apresentando valores de R^2 de 0,56 e de 0,79 para o leite e para o soro, respectivamente.

Choi e Okos (1986), citados por Rahman (1995) e por Urbicain e Lozano (1997),

apresentaram correlações para as massas específicas dos componentes principais dos alimentos, na faixa de temperaturas de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, para suspensões com conteúdo de sólidos de 0% a 95%. Os valores, presentes na literatura, preditos por estas equações apresentam cerca de 3,9% de erro para alimentos líquidos em geral e de 4,7% de erro para leite concentrado, suco de laranja e salsicha.

Os resultados obtidos para a densidade apresentaram o comportamento esperado e seguiram a tendência de variação com a temperatura descrita na literatura para soluções modelo similares a creme de leite (MOURA et al., 2001), leite bovino (MINIM et al., 2002) e leite de coco (TANSAKUL e CHAISAWANG, 2006).

Alcântara et al. (2012) ao estudarem o efeito da temperatura e do teor de gordura nas propriedades termofísicas de leite de coco, constataram que o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais da densidade do leite de coco apresentou efeito linear para o teor de gordura e efeito quadrático para a temperatura.

4.2.2. Calor Específico

De acordo com os dados apresentados nas Tabelas 5, nota-se que o calor específico variou de $2,46\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ a $5,99\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ para as amostras de leite de búfala. Estes valores estão na mesma ordem dos relatados para diferentes gêneros alimentícios (MINIM et al., 2002; 2009; TANSAKUL e CHAISAWANG, 2006; FONTAN et al., 2009). Minim et al., (2002) em gordura encontraram valores entre $3.369\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ e $4,124\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ para o leite bovino com diferentes teores de umidade.

Tabela 5. Valores experimentais do calor específico do leite de búfala.

Teor de sólidos (%)	5	20	35	50	65	80
T (K)	Calor Específico (kJ/kg·K)					
278	5,85	5,57	5,15	4,85	4,02	3,29
293	5,63	4,98	4,28	4,20	3,66	3,23
308	5,99	5,11	4,62	4,69	3,11	3,29
323	5,31	5,11	4,29	3,53	3,24	3,19
338	5,05	4,97	4,92	4,26	3,42	3,05
353	5,61	4,91	4,70	4,28	2,97	2,58
368	5,11	4,92	4,52	3,43	2,87	2,46

Na Tabela 6 estão apresentados os valores e de $2,50\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ a $5,81\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ para as amostras do soro. Nas Tabelas 5 e 6 verifica-se que os dados de calor específico das

amostras diminuiriam com o aumento da concentração. Os menores valores foram obtidos para as amostras com 80% de sólidos e os maiores para amostras com 5% de sólidos, refletindo o maior valor dessa propriedade para amostras com maior fração de água. Verifica-se assim a influência da concentração sobre o calor específico, indicando que o volume de investimentos necessários no projeto de instalações de processamento destinadas a trocas de calor não é pequeno, uma vez que parte dos custos se relaciona às dimensões do equipamento, que por sua vez determinam a quantidade de energia a ser adicionada ou removida nos processos de aquecimento e resfriamento (MANOHAR, 1991).

Souza et al., (2010) e Silva et al., (2010) também relataram aumento nos resultados do calor específico com aumento da umidade. Comportamento semelhante ao descrito por Minim et al., (2002) e Tansakul e Chaisawang (2006) estudando as propriedades termofísicas de leite bovino e leite de coco, respectivamente.

Tabela 6. Valores experimentais do calor específico do soro de búfala.

Teor de sólidos (%)	5	20	35	50	65	80
T (K)						
	Calor Específico (kJ/kg·K)					
278	5,43	4,67	4,11	3,59	3,56	2,98
293	5,31	5,22	4,14	3,51	3,19	2,99
308	5,81	5,79	4,91	4,79	4,73	2,90
323	4,81	4,68	4,57	4,45	3,91	3,03
338	4,95	4,91	4,52	3,92	3,81	2,76
353	5,67	5,58	4,20	4,08	3,12	2,75
368	3,75	3,39	3,07	2,94	2,77	2,50

Segundo Rahman (2009), o efeito da temperatura no calor específico para o alimento não congelado é desprezível, sendo, portanto, utilizada uma média para representar esta propriedade no alimento descongelado. Quanto maior for o calor específico de uma substância, maior a dificuldade para sofrer variações em sua temperatura. Tansakul e Chaisawang (2006) verificaram que o teor de gordura tem maior efeito sobre o calor específico do leite de coco, quando comparado à temperatura.

As Figuras 4 e 5 exibem a correlação da temperatura e do teor de sólidos com o calor específico, as quais foram obtidas por meio de equações polinomiais de ajuste (Equações 8 e 9) apresentando coeficientes de correlação (R^2) de 0,91 para o leite e 0,80 para o soro. Esta informação indica que os modelos são adequados para prever o comportamento do calor específico, dentro dos limites de temperatura e teor de sólidos estudados.

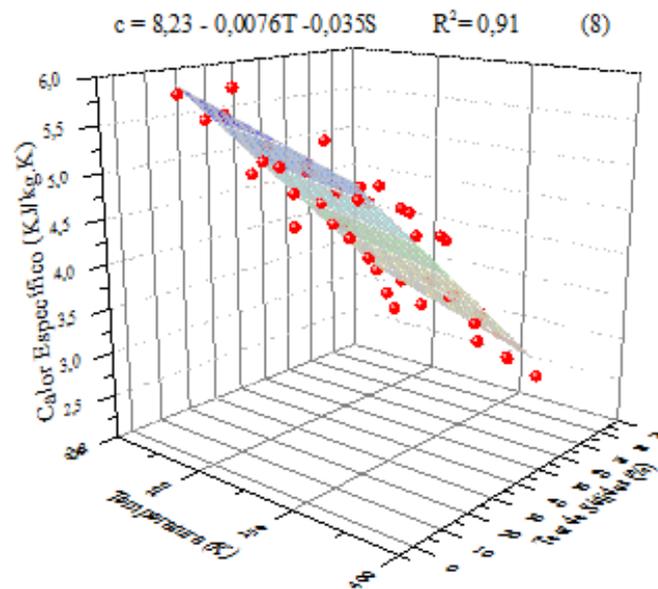


Figura 4. Variação do calor específico do leite de búfala com a temperatura e o teor de sólidos. c: calor específico (kJ/kg·K); T: temperatura (K); S: Teor de sólidos (%).

O modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais do calor específico do leite de búfala foi do tipo linear simples (Equação 8). Modelo similar ao verificado por Júnior et al. (2011) para calor específico de leite bovino.

$$c = -37,2 + 0,273T - 0,022S - 0,00043T^2 - 0,00009S^2 \quad R^2 = 0,80 \quad (9)$$

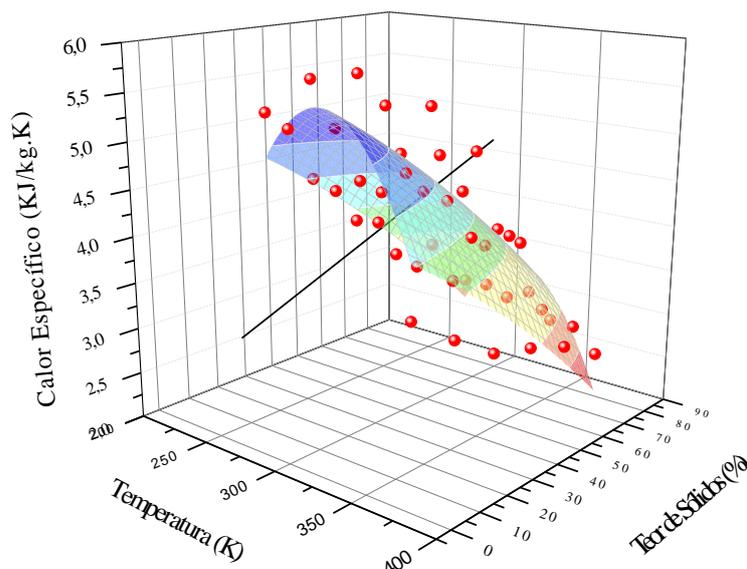


Figura 5. Variação do calor específico do soro de búfala com a temperatura e o teor de sólidos. c: calor específico (kJ/kg·K); T: temperatura (K); S: Teor de sólidos (%).

4.2.3. Difusividade Térmica

De forma geral, a difusividade térmica diminuiu com a redução do conteúdo de umidade (Tabela 7 e 8). Esse comportamento significa, em termos físicos, que o aumento da concentração diminui a velocidade com que o calor se propaga ou se difunde através do leite e do soro, a qual é representada pelo valor da difusividade, sendo uma propriedade necessária para a otimização de processos dentro dos cálculos da engenharia.

Tabela 7. Valores experimentais da difusividade térmica do leite de búfala.

Teor de sólidos (%)	5	20	35	50	65	80
T (K)	Difusividade Térmica x 10⁷ (m²/s)					
278	9,19	8,11	6,91	5,10	4,58	4,69
293	8,12	7,01	5,10	5,01	4,90	4,01
308	7,80	8,11	9,11	5,60	5,01	5,71
323	7,80	7,11	6,21	5,45	4,21	4,52
338	8,89	8,31	8,54	6,90	3,91	4,12
353	8,10	7,51	7,84	4,19	4,10	4,33
368	9,11	8,14	8,11	5,11	4,32	5,22

Bozikova (2009) estudando as propriedades térmicas do leite bovino, em função da temperatura e da gordura, obteve valores de difusividade térmica $12,9 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ para 0,5% de gordura, $13,45 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ para 1,5% de gordura e $13,86 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ para 5% de gordura. Verificou o aumento na difusividade térmica com o aumento do teor de gordura. Júnior et al. (2011) encontraram, para o leite bovino, valores de difusividade térmica entre $(1,00 \text{ e } 9,03) \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, semelhantes aos observados no presente trabalho (Tabelas 7 e 8) .

Tabela 8. Valores experimentais da difusividade térmica do soro de búfala.

Teor de sólidos (%)	5	20	35	50	65	80
T (K)	Difusividade Térmica x 10⁷ (m²/s)					
278	7,87	7,76	7,84	6,52	5,11	3,58
293	8,84	8,10	7,62	7,60	6,47	3,54
308	8,33	7,77	7,20	4,81	4,97	4,48
323	6,84	6,81	4,21	4,31	3,91	3,44
338	5,47	5,28	5,27	4,24	4,61	3,14
353	7,81	7,65	6,85	5,65	5,81	4,94
368	7,95	5,87	4,87	4,71	4,22	3,52

De acordo com as equações 10 e 11, observa-se que a difusividade térmica do leite e do soro bubalino varia linearmente com o teor de sólidos e com a temperatura. Os coeficientes de determinação (R^2) de 0,74 para o leite e de 0,66 para o soro foram considerados satisfatórios.

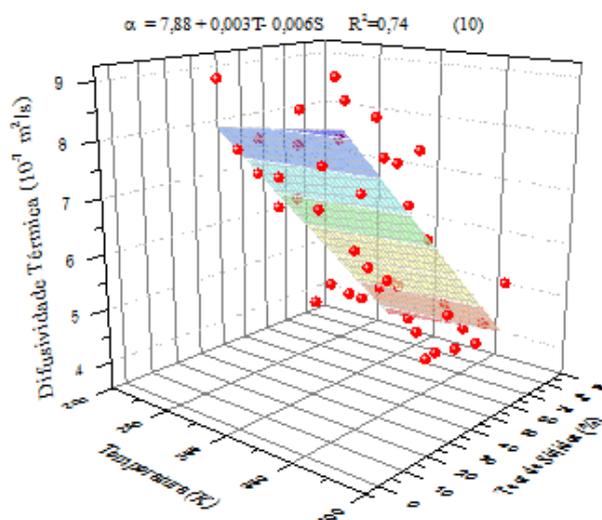


Figura 6. Variação da difusividade térmica do leite de búfala com a temperatura e o

teor de sólidos. α : difusividade térmica (m^2/s); T: temperatura (K); S: Teor de sólidos (%).

Júnior et al. (2011) no estudo do efeito da temperatura e da composição do leite bovino na difusividade térmica e no calor específico relataram que a difusividade térmica apresentou um comportamento polinomial quadrático.

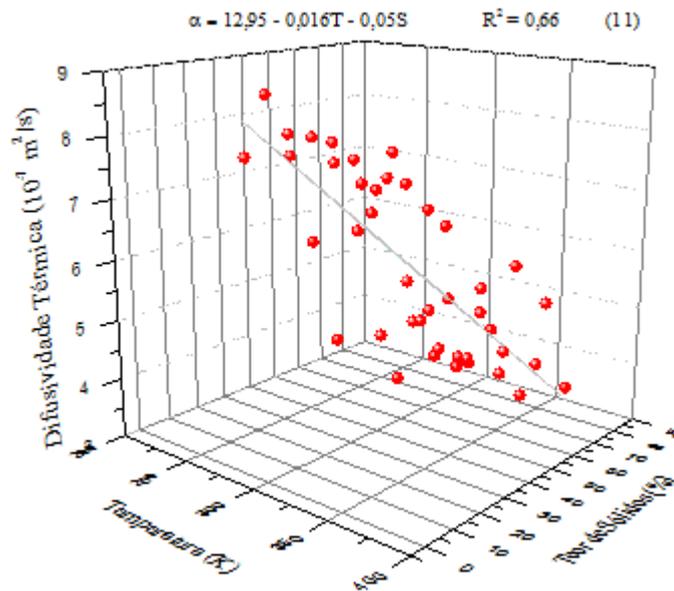


Figura 7. Variação da difusividade térmica do soro de búfala com a temperatura e o teor de sólidos. α : difusividade térmica (m^2/s); T: temperatura (K); S: Teor de sólidos (%).

4.2.4. Condutividade Térmica

O valor mínimo de condutividade térmica foi de $0,98 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, na temperatura de 5°C e 5% de sólidos totais e o valor máximo foi de $4,84 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, na temperatura de 95°C e 20% de sólidos totais para as amostras de leite (Tabela 9).

A condução em matérias sólidas está intimamente ligada ao aumento da energia cinética das moléculas que, nos condutores, podem oscilar a grande velocidade e amplitudes. Esta excitação molecular, referida em inglês como “bumping” propaga-se pelo material e, conseqüentemente, continua o processo de transmissão de calor (condução). Portanto, a condutividade térmica depende tanto da estrutura molecular como da composição química (nível eletrônico atômico) e também da estruturação

física na qual as moléculas se inserem (estrutura física). Figura e Teixeira (2003) comentam que no caso de sucos de frutas a condutividade térmica é próxima à água pura nas mesmas condições de pressão e temperatura, porém, certos alimentos podem conter ar atmosférico e outros gases, retidos, e nestes casos os valores de condutividade térmica sofrerão alterações. Além dos efeitos do estado do material, a condutividade térmica é função da temperatura.

Tabela 9. Valores experimentais da condutividade térmica do leite de búfala.

Teor de sólidos (%)	5	20	35	50	65	80
T (K)	Condutividade Térmica (W/m²·K)					
278	0,98	1,86	1,19	1,35	1,98	2,81
293	1,55	2,46	2,82	2,28	2,43	3,35
308	2,10	3,15	3,96	3,68	3,27	3,53
323	2,17	3,85	3,59	2,18	3,04	3,78
338	3,75	3,12	3,32	3,87	3,80	3,91
353	3,84	3,90	3,86	3,76	3,08	4,29
368	4,75	4,84	3,63	3,88	3,22	4,13

Bozikova (2009) avaliando as propriedades térmicas do leite bovino em função da temperatura e da gordura relatou valores de condutividade térmica de 0,592 W/m²·K para 0,5 % de gordura; 0,556 W/m²·K para 1,5 % de gordura e 0,54 W/m²·K para 3,5 % de gordura.

Já para as amostras do soro o valor mínimo foi de 1,12 W/m²·K, na temperatura de 5°C e 5% de sólidos totais e o valor máximo foi de 7,49 W/m²·K, na temperatura de 95°C e 5% de sólidos totais (Tabelas 10). Segundo Rao e Rizvi (2005) a água tem condutividade térmica muito mais elevada que os outros componentes do alimento, o que ocasiona um aumento da condutividade com o incremento da umidade do produto. Resultados apresentados na Tabela 10 evidenciam esse efeito, pois amostras com 5% de sólidos, conseqüentemente com maior quantidade de água, apresentaram os maiores valores da condutividade térmica do soro.

Tabela 10. Valores experimentais da condutividade térmica do soro de búfala.

Teor de sólidos (%)	5	20	35	50	65	80
T (K)	Condutividade Térmica (W/m²·K)					
278	1,12	1,65	1,30	2,25	2,14	2,02
293	1,86	1,98	2,51	2,67	2,87	3,54
308	2,95	3,25	2,84	1,66	5,57	3,63
323	4,54	2,99	2,16	2,72	3,66	4,03
338	4,21	3,87	5,61	4,33	4,85	4,11
353	7,26	5,85	4,91	5,39	3,08	4,29
368	7,49	5,54	5,13	5,03	6,08	5,95

As equações 12 e 13 mostram que a condutividade térmica de leite e de soro de búfala pode ser determinada em função da temperatura e do teor de sólidos totais, com coeficientes de correlação, R^2 , de 0,76 (soro) e 0,78 (leite).

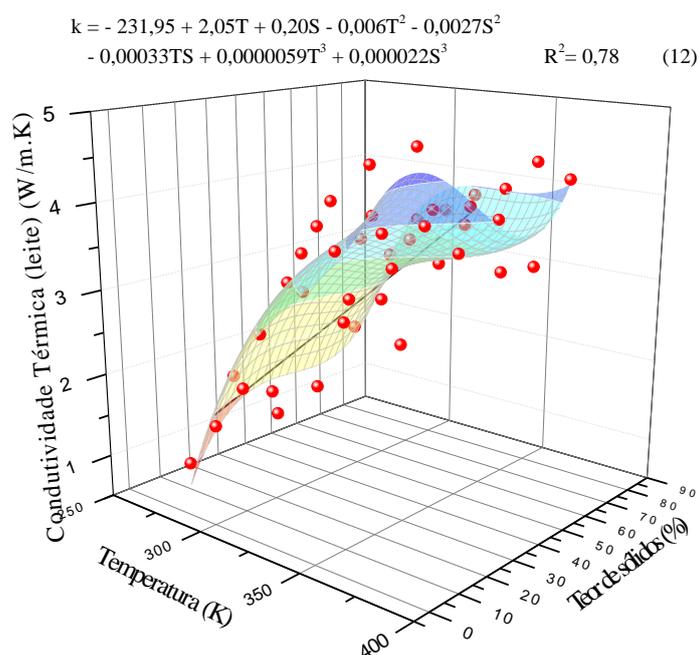


Figura 8. Variação da condutividade térmica do leite de búfala com a temperatura e o teor de sólidos. k: condutividade térmica (W/m·K); T: temperatura (K); S: Teor de sólidos (%).

De acordo com as equações 12 e 13 observa-se que o modelo polinomial quadrático foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais para ambas as amostras leite e soro. Este comportamento diverge do comportamento do leite e de derivados lácteos bovino para os quais os melhores ajustes foram com modelos lineares. Minim (2002), por exemplo, avaliaram algumas das propriedades termofísicas de leite integral, leite desnatado e leite desnatado e encontraram uma relação linear entre todas as propriedades estudadas. Segundo esses autores o teor de água foi o fator que mais afetou as propriedades por eles avaliadas. Tavman e Tavman (1999) analisaram a condutividade térmica de 11 tipos de queijos, de 4 tipos de iogurtes e de 1 amostra de manteiga em função do teor de gordura, de proteína e de água sobre a condutividade térmica. Os valores medidos exibiram uma dependência linear direta com o teor de água, mas inversa com os teores de gordura e proteína dos produtos lácteos.

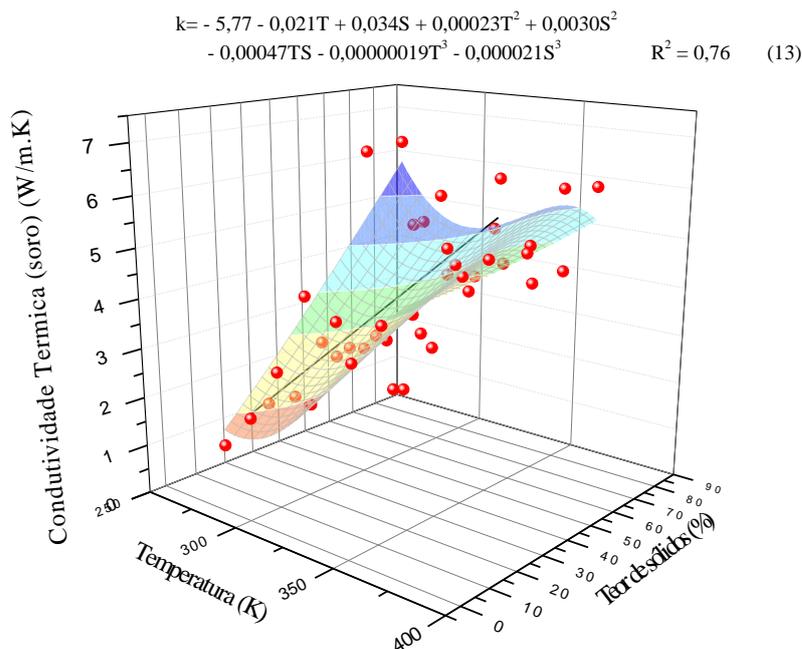


Figura 9. Variação da condutividade térmica do soro de búfala com a temperatura e o teor de sólidos. k: condutividade térmica (W/m·K); T: temperatura (K); S: Teor de sólidos (%).

4.3. Comportamento Reológico

O comportamento reológico das amostras de leite e soro de búfala pode ser analisado por meio das Figuras 10 a 16 e Tabelas 11 a 14.

Diferentes modelos matemáticos, tais como, Casson, Herschel-Bulkley, foram

ajustados aos dados experimentais em todas as temperaturas estudadas para estimar os parâmetros das equações. Dentre estes o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais (Tabela 11) foi o de Ostwald de Waele ou, igualmente, da Lei da Potência (Equação 16), apresentando coeficiente de determinação mais elevado.

Tabela 11. Coeficientes de determinação do ajuste do modelo da Lei da Potência correspondentes aos reogramas (Figuras 10, 11, 12 e 13).

Temperatura (K)	288	298	308	318	328	338
Teor Sólido (%)						
	R² – Lei da Potência (v = A·X^B) (14)					
5	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90	0,89
20	0,84	0,92	0,90	0,90	0,91	0,88
35	0,98	0,95	0,92	0,86	0,77	0,81
50	0,96	0,83	0,68	0,95	0,99	0,99

Verificam-se, na Tabela 11, os valores dos coeficientes de determinação (R²) do ajuste do modelo da Lei da Potência aos dados de viscosidade em função da temperatura do leite de búfala, nos diferentes teores de sólidos. Nota-se que os valores de R² variaram entre 0,68 e 0,99, o que se traduz em um bom grau de confiabilidade da utilização da equação tipo Lei da Potência para estimar a viscosidade aparente do leite de búfala em função da temperatura, podendo ainda afirmar que o efeito da temperatura foi descrito de forma satisfatória pela equação.

Oliveira et al. (2008), ao avaliarem o comportamento reológico de diferentes tipos de sorvete, também utilizaram o modelo da Lei da Potência para ajustar os dados experimentais. O mesmo modelo também foi utilizado por Bezerra (2010) para ajustar aos dados experimentais do iogurte de leite de cabra.

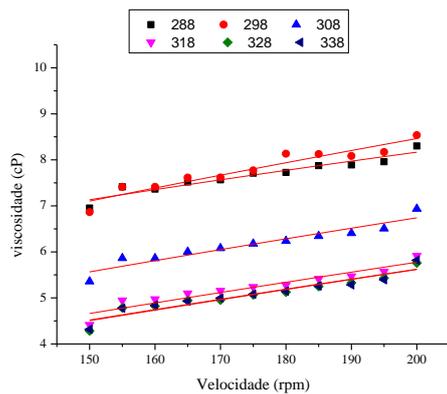


Figura 10. Reograma do leite de búfala com 5% de sólidos nas temperaturas de 288 K, 298 K, 308 K, 318 K, 328 K, 338 K..

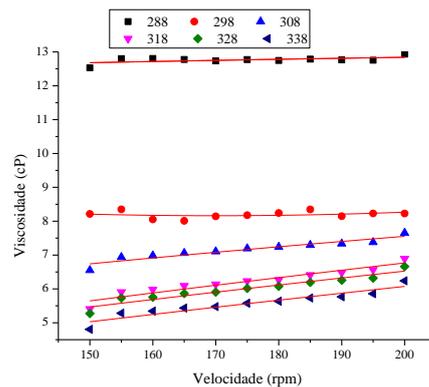


Figura 11. Reograma do leite de búfala com 20% de sólidos nas temperaturas de 288 K, 298 K, 308 K, 318 K, 328 K, 338 K..

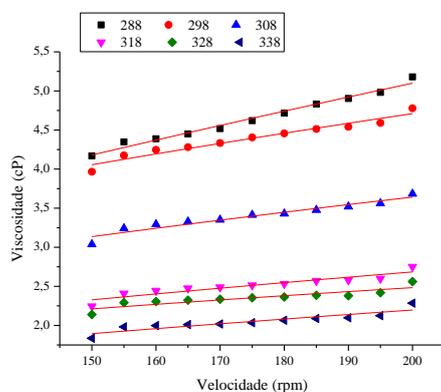


Figura 12. Reograma do leite de búfala com 35% de sólidos nas temperaturas de 288 K, 298 K, 308 K, 318 K, 328 K, 338 K.

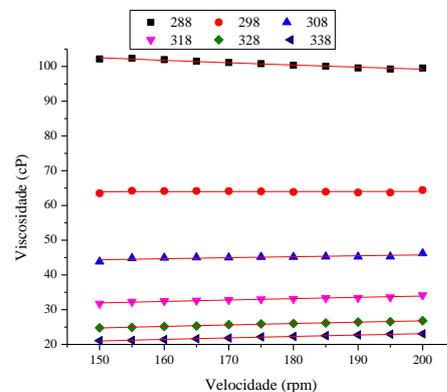


Figura 13. Reograma do leite de búfala com 50% de sólidos nas temperaturas de 288 K, 298 K, 308 K, 318 K, 328 K, 338 K.

Observa-se, nas Tabelas 12 e 13, o aumento dos valores de viscosidade aparente do leite e do soro com o aumento da concentração, exceto para as amostras de leite com a concentração de 35 % de sólidos totais. Nota-se também que a viscosidade aparente decresce com o aumento da temperatura, exibindo um comportamento não newtoniano. De acordo com Hassan e Hobani (1998), com o aumento da temperatura, a energia térmica e as distâncias moleculares aumentam devido à redução das forças intermoleculares, causando uma diminuição na viscosidade aparente.

Comportamento semelhante foi descrito por Silva et al. (2005), para o suco de acerola, de uma redução da viscosidade aparente com o aumento da temperatura.

Do ponto de vista industrial, a diminuição da viscosidade aparente facilita o escoamento dos fluidos (leite e soro) e a troca de calor durante o processamento. Sabe-

se que quanto menor a viscosidade aparente de um fluido, menor é a perda de carga durante o escoamento, o que resulta em um menor gasto de energia.

Tabela 12. Valores experimentais médios da viscosidade aparente de leite de búfala.

Temperatura (K)		288	298	308	318	328	338
TS (%)	V (rpm)	Viscosidade aparente (cP)					
5	150	6,9535	6,8635	5,3588	4,4140	4,2840	4,3165
5	155	7,4137	7,4113	5,8632	4,9465	4,7844	4,7772
5	160	7,3648	7,4140	5,8628	4,9723	4,8200	4,8411
5	165	7,5188	7,6142	6,0032	5,0989	4,9444	4,9284
5	170	7,5667	7,6174	6,0803	5,1540	4,9555	4,9952
5	175	7,7104	7,7704	6,1786	5,2381	5,0689	5,0774
5	180	7,7254	8,1336	6,2382	5,2780	5,1259	5,1468
5	185	7,8753	8,1266	6,3432	5,4150	5,2488	5,2610
5	190	7,8891	8,0844	6,4071	5,4698	5,3278	5,2843
5	195	7,9598	8,1694	6,5063	5,5718	5,4315	5,3950
5	200	8,3007	8,5369	6,9360	5,9162	5,7587	5,8187
20	150	12,529	8,2126	6,5511	5,4063	5,2713	4,8039
20	155	12,800	8,3498	6,9372	5,9068	5,7302	5,2827
20	160	12,805	8,0509	6,9828	5,9799	5,7550	5,3426
20	165	12,776	8,0107	7,0575	6,0918	5,8623	5,4352
20	170	12,734	8,1422	7,1036	6,1354	5,9038	5,4760
20	175	12,772	8,1775	7,1941	6,2322	6,0158	5,5766
20	180	12,747	8,2413	7,2401	6,2632	6,0757	5,6362
20	185	12,785	8,3465	7,2937	6,4121	6,1912	5,7312
20	190	12,765	8,1464	7,3365	6,4821	6,2572	5,7658
20	195	12,754	8,2281	7,3772	6,5639	6,3198	5,8564
20	200	12,934	8,2272	7,6521	6,8910	6,6623	6,2386
35	150	4,1691	3,9654	3,0368	2,2445	2,1395	1,8358
35	155	4,3478	4,1749	3,2412	2,4091	2,2918	1,9810
35	160	4,3877	4,2471	3,2934	2,4440	2,3057	1,9976
35	165	4,4501	4,2809	3,3276	2,4744	2,3233	2,0109
35	170	4,5177	4,3336	3,3511	2,4877	2,3344	2,0179
35	175	4,6200	4,4047	3,4139	2,5140	2,3544	2,0342
35	180	4,7156	4,4563	3,4294	2,5327	2,3640	2,0662
35	185	4,8314	4,5122	3,4766	2,5707	2,3863	2,0873
35	190	4,9035	4,5404	3,5193	2,5790	2,3797	2,0975
35	195	4,9816	4,5903	3,5607	2,5984	2,4187	2,1245
35	200	5,1795	4,7783	3,6835	2,7500	2,5607	2,2851

Continuação. Tabela 12. Valores experimentais médios da viscosidade aparente de leite de búfala.

50	150	6,8835	5,7387	5,1913	4,7539	3,6167	3,3592
50	155	7,2250	6,0470	5,5367	4,9344	4,1217	3,4265
50	160	7,2148	6,0690	5,5839	4,9723	4,0866	3,5265
50	165	7,3029	6,1623	5,6283	5,0466	4,1604	3,1258
50	170	7,3404	6,2214	5,6745	5,1386	4,1726	3,1526
50	175	7,4234	6,3157	5,7801	5,2638	4,2548	3,2548
50	180	7,4963	6,3319	5,8383	5,3446	4,2595	4,1253
50	185	7,5227	6,4344	5,8690	5,4961	4,3247	3,5826
50	190	7,5615	6,4782	5,9158	5,6157	4,3510	3,4525
50	195	7,6579	6,5466	5,9718	5,6757	4,4317	3,1252
50	200	7,8770	6,9060	6,3623	6,0699	4,7764	3,8569

Onde: TS: Teor de sólidos; V: velocidade.

Tabela 13. Valores experimentais médios da viscosidade aparente de soro de búfala.

Temperatura (K)		288	298	308	318	328	338
TS (%)	V (rpm)	Viscosidade aparente (cP)					
5	150	6,8835	5,7387	5,1913	4,7539	3,6167	3,3592
5	155	7,2250	6,0470	5,5367	4,9344	4,1217	3,4265
5	160	7,2148	6,0690	5,5839	4,9723	4,0866	3,5265
5	165	7,3029	6,1623	5,6283	5,0466	4,1604	3,1258
5	170	7,3404	6,2214	5,6745	5,1386	4,1726	3,1526
5	175	7,4234	6,3157	5,7801	5,2638	4,2548	3,2548
5	180	7,4963	6,3319	5,8383	5,3446	4,2595	4,1253
5	185	7,5227	6,4344	5,8690	5,4961	4,3247	3,5826
5	190	7,5615	6,4782	5,9158	5,6157	4,3510	3,4525
5	195	7,6579	6,5466	5,9718	5,6757	4,4317	3,1252
5	200	7,8770	6,9060	6,3623	6,0699	4,7764	3,8569
20	150	12,1899	6,7562	6,6723	5,4367	5,5076	4,7327
20	155	13,2668	6,6151	7,1275	5,2203	5,6938	4,7116
20	160	13,3687	7,5316	6,7931	5,7464	5,3798	4,6550
20	165	13,8421	8,0137	6,8947	6,0187	5,5130	4,6697
20	170	13,5106	7,7143	6,9077	6,1366	5,6349	4,9434
20	175	13,3438	7,6997	6,9457	6,1161	5,8233	5,0110
20	180	13,0431	8,1727	6,9812	6,3614	5,9507	5,5119
20	185	12,8949	8,0552	7,0957	6,5957	6,1025	5,6860
20	190	12,8908	8,0286	7,1514	6,2982	6,1143	5,6245
20	195	13,0266	8,2943	7,1897	6,3455	6,1936	5,7936
20	200	13,1864	8,6948	7,5683	6,3670	6,1623	5,8636

Onde: TS: Teor de sólidos; V: velocidade.

Têm-se, nas Figuras 14 e 15 a representação os dados e os coeficientes de determinação (R^2) de viscosidade aparente do soro de búfala em função da temperatura, para diferentes teores de sólidos (5% e 20%). Constata-se valores de R^2 de 0,87 e 0,83 para 5% e 20% de sólidos totais, respectivamente, o que se traduz em um bom grau de confiabilidade das equações (15 e 16) de regressões para estimar a viscosidade aparente do soro de búfala em função da variação de temperatura (288 K a 338 K).

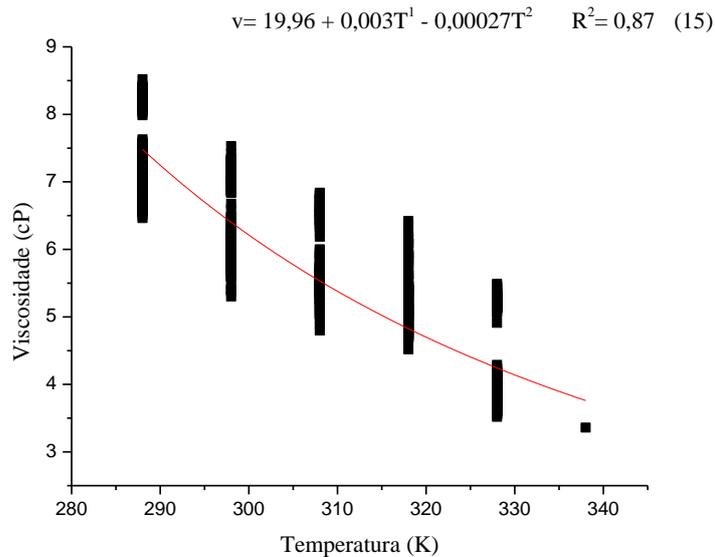


Figura 14. Variação da viscosidade aparente com a temperatura para soro de búfala com 5% de sólidos totais.

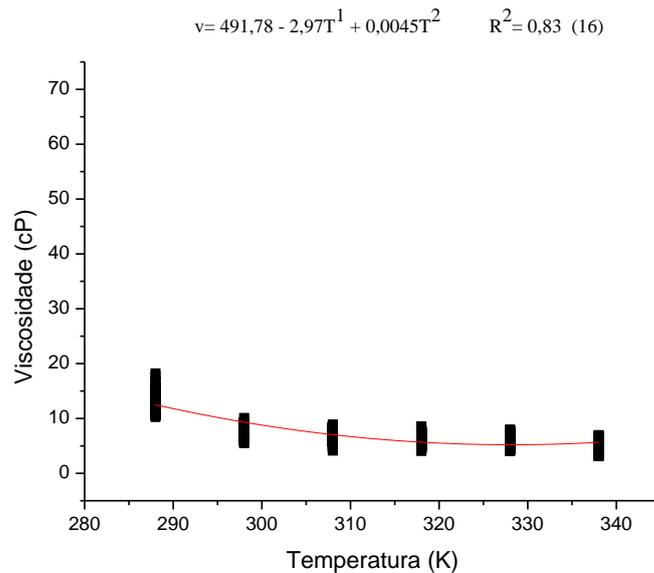


Figura 15. Variação da viscosidade aparente com a temperatura para soro de búfala com 20% de sólidos totais.

4.3.1. Efeito Combinado da Temperatura e da Concentração

É útil nos projetos de engenharia obter uma relação única e simples para descrever o efeito combinado entre temperatura e concentração. Assim, as equações (4 e 5) foram ajustadas aos dados experimentais em função da concentração e da temperatura. Essas equações já foram usadas por diversos autores quando combinado o efeito da temperatura e da concentração para derivados de frutas (VITALI et al., 1974; ADORNO, 1997; IBARZ et al., 1995; RAO, 1984).

$$\eta = a_1 \cdot C^{b1} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

$$\eta = a_2 \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT} + b_2 C\right) \quad (5)$$

Feito o ajuste das equações preditas na literatura, foi obtida a equação (17) para o cálculo da viscosidade quando se combina o efeito da temperatura e da concentração do leite de búfala. A concentração variou de 5% a 50% de sólidos na faixa de temperatura de 15 °C a 65 °C.

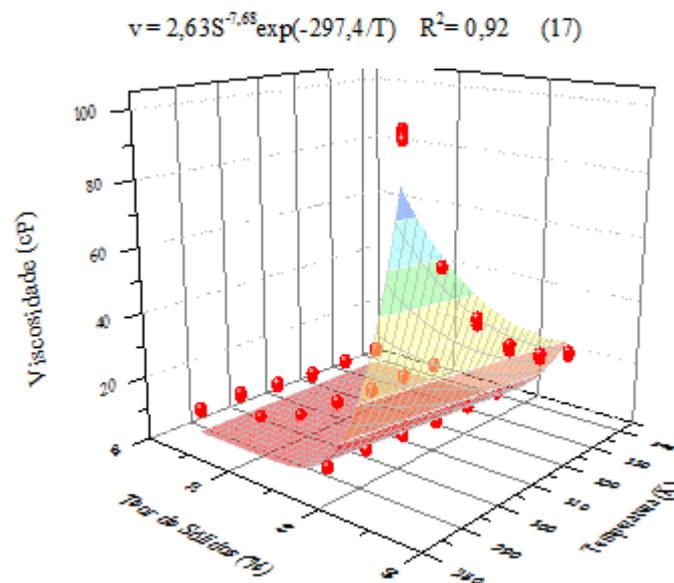


Figura 16. Efeito combinado do teor de sólidos e da temperatura sobre a viscosidade aparente do leite bubalino.

Como esperado, a viscosidade aparente aumenta com o aumento do teor de sólidos e diminui com o aumento da temperatura. Esta equação apresentou um bom coeficiente de determinação ($R^2 = 0,92$).

Tabela 14. Valores da Energia de Ativação para as viscosidades em rotações máxima, média e mínima.

Viscosidade (cP)	Energia de Ativação (Ea) kJ/mol
Viscosidade (máxima)	27,96
Viscosidade (média)	22,47
Viscosidade (mínima)	25,57

Têm-se na Tabela 14 os valores das energias de ativação das viscosidades nas diferentes velocidades de rotação (mínima, média e máxima) do leite de búfala nas temperaturas de (15, 25, 35, 45, 55 e 65) °C e nas concentrações de (5, 20, 35 e 50)% de sólidos totais.

Os valores de energia de ativação encontrados são consistentes com os valores disponíveis na literatura para fluidos alimentícios. Valores para a energia de ativação, Ea, em torno de (19,44 a 25,83) kJ/mol foram relatados por Flauzino et al. (2009) e González- Tello et al. (2009), que estudaram o efeito da gordura sobre as propriedades reológicas de creme de leite bovino e soluções de concentrado proteico de soro, respectivamente.

Dados de energia de ativação na faixa de 7229,9 J/mol a 6723,6 J/mol foram disponibilizados por Vélez-Ruiz e Barbosa-Cánovas (1998), para o leite de vaca concentrado, e por Tang et al. (1993), para soluções concentradas de proteína de soro de leite.

De acordo com Steffe (1996), valores mais altos de Ea indicam uma mudança mais rápida na viscosidade com a temperatura. A energia de ativação é necessária para movimentar as moléculas, como uma função do aumento da temperatura, e o fluido escoar mais facilmente devido à alta energia de ativação em altas temperaturas (GÜRSES e BAYRAKÇEKEN, 1996).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram determinados, para o leite e soro de búfala, dados de propriedades termofísicas (condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico e massa específica) e informações sobre o comportamento reológico. Os dados obtidos são úteis em análises de processos de transferência de calor e massa contendo o leite e produtos derivados do leite e do soro bubalinos e na otimização de processos envolvendo os compostos fluidos estudados.

Com base nos resultados obtidos, as equações propostas podem ser usadas para o cálculo das propriedades termofísicas do leite e do soro bubalino em uma ampla faixa de temperatura e conteúdo de sólidos totais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIQ. **Associação Brasileira de Indústrias de Queijo**. Notícias. Abiq.com.br. Disponível em: <http://www.abiq.com.br/>. Acessado em 05/03/2013.

ABU-JDAYIL, B. **Modelling the time-dependent rheological behaviour of semisolid foodstu**. S. Journal of food Engineering, V. 57, p97-102, 2003.

ADORNO, R. A.C. **Reologia de sucos de frutas tropicais**. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas- SP, 1997.

ALVARADO, J.D.; AGUILERA, J.M. **Métodos para medir Propriedades Físicas em Indústrias de Alimentos**. Ed. Acribia S.A. Zaragoza, 2001. p.410.

ARAÚJO, J. L., QUEIROZ, A. J. M., FIGUEIREDO, R. M. F. **Propriedades termofísicas da polpa do cupuaçu com diferentes teores de sólidos**. Ciência Agrotécnica. Lavras, v.28, n.1, p. 126-134, jan/fev, 2004;

BAHATTACHARYA S.; RASTOGI, N. K. **Rheological properties of enzyme-treated mango pulp**. Journal of food Engineering, V. 36, 248-262, 1998.

BEZERRA, M, F. **Caracterização físico-química e sensorial, reológica e sensorial de iogurte obtido pela mistura dos leites bubalino e caprino**. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

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

BOZIKOVA, M. **Thermal conductivity and thermal diffusivity values of foods**, PTEP, vol. 13, pp. 274–279, 2009.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária/São Paulo. Associação Brasileira de Criadores de Búfalos. **O búfalo**. Brasília DF, 1991. 320p.

BRYAN, R. B.; BRIAN, A.F. **Food thermophysical property models**. Comun. Heat Mass Transfer. V. 26, No 5, p.627-636, 1999;

CAPITANI. D. L., **Recuperação de proteínas do soro do leite por meio de coaceração com polissacarídeo**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, n. 11, p. 1123-1128, nov, 2005.

CARSON, J. K. **Review of effective thermal conductivity models for food**. International Journal of Refrigeration, Surrey, v. 29, n. 6, p. 958-967, 2006.

CASTRO, A. L., **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**, São Carlos, 2007, p, Tese (Doutorado em Ciência e

Engenharia dos Materiais), Área de Interinidades em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Paulo (USP).

CASTRO, A.G, COVAS, J.A.; DIOGO, A.C. **Reologia e suas aplicações industriais**. Coleção Ciência e Técnica , Instituto Piaget, Lisboa, 2001.

CHARM, S.E. **The direct determination of shear stress-shear rate behavior of foods in the presence of yield stress**. Journal of Food Science , Massachusetts, v.28, n.1, p.107-117, 1963.

CHHABRA, R. P; RICHARDSON, J.F, **Non Newtonian flow and Applied Rheology. Engineering applications**, 2 edição, Amsterdan, Holanda, Elsevier, 2008.

CHOI, Y.; OKOS, M.R. **Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods**. In: Lemauguer, M.; Jelen, M. (eds.). **Food engineering and process applications: transport phenomena**. London: Elsevier Applied Science, 1986. cap. 6, p. 93-101.

COIMBRA J.S.R., GABAS A.L., MINIM L.A., GARCIA ROJAS E.E., TELIS V.R.N., TELIS-ROMERO J., **Density, heat capacity and thermal conductivity of liquid egg products**. Journal of Food Engineering, 2006, 74, 186-190.

DINIZ, M. D.S. **Caracterização do comportamento reológico e determinação de propriedades termofísicas da polpa de manga-ubá**. 71f, Dissertação de Mestrado. UFV. Viçosa. 2009.

EGAWA, E, Y., **Caracterização térmica e reológica de blendas de glicerol: colágeno tipo I de diferentes tecidos**, São Carlos, 2007, p, Dissertação (Mestrado em Ciência – Química Analítica), Instituto de Química de São Paulo, Universidade de São Paulo (USP).

FERRARA, B.; INTRIERI, F. **Características e emprego do leite de búfala**. Zootecnia, v. 13, n. 1, p 25-50, 1975.

FLAUZINO, R. D.; GUT, J. A. W.; TADINI, C. C.; TELIS-ROMERO, J. (2009). **Flow properties and tube friction factor of milk cream: influence of temperature and fat content**. J. Food. Process Eng. In press. Published Online: Jun, 16 of 2009.

FONTAN, R. C. I.; SANTOS, L. S.; BONOMO, R. C. F.; LEMOSs, A. R.; RIBEIRO, R. P.; VELOSO, C. M. **Thermophysical properties of coconutwater affected by temperature**. J. Food Process Eng., 32, 382-397 (2009).

FONTANA, A. J., VARITH, J., IKEDIALA, J., REYES, J. , WACKER, B. **Thermal properties of selected foods using a dual needle heat-pulse sensor.** ASAE/CSAE-SCGR Annual International Meeting, 1999, Toronto Canada.

GANGULI, U. C. **Tecnologia do leite de búfala da zona da mata mineira.** Rev. Criad., v. 35, n. 211, p 43-47, 1981.

GAUCHE, C. **Physical properties of yoghurt manufactured with milk whey and transglutaminase,** LWT- Food and Science Technology, Florianópolis, p. 239-243, 2009.

GONZÁLEZ SISO, M. I. The biotechnological utilization of cheese whey: a review. **Bioresource Technology**, Essex., v.57, n.1, p.1-11, mar.1996.

GONZÁLEZ-TELLO, P.; CAMACHO, F.; GUADIX, E. M.; LUZÓN, G.; GONZÁLEZ, P. A. **Density, viscosity and surface tension of whey protein concentrate solutions.** J. Food Process Eng., 32, 235-247 (2009).

GUIMARÃES, G. C.; Coelho Júnior, M. C.; Garcia Rojas, E. E. **Density and kinematic viscosity of pectin aqueous solution.** *J. Chem. Eng. Data*, 54, 662-667(2009).

HAMINIUK, C.,H., I. Comportamento Reológico e Fracionamento Péctico das Polpas Integrais de Araçá (*Psidium cattleianum* sabine) e Amora-Preta (*Rubus* spp), Curitiba, 2005. (Tese de Mestrado).

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

HOLDSWORTH, S.D. **Applicability of rheological models to the interpretation of flow and processing behaviour of fluid food products.** Journal of Texture Studies, v. 2, n. 4, 1971.

HÜHN, S.; LOURENÇO JUNIOR, J.B.; MOURA CARVALHO, L.O.D.; NASCIMENTO, C.N.B.; VIEIRA, L.C. **Aproveitamento do leite de búfala em produtos derivados.** In: Simpósio do Trópico Úmido, 1., 1984, Belém. **Anais.** Belém: Embrapa-CPATU, 1986. v.5, p.265-269. (Embrapa-CPATU. Documentos, 36).

IBARZ, A., BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. **Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos.** Technomic. Publishing companing, Inc. Pennsylvania – USA, p.85-204, 1996.

INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa.** 5ª edição, LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro, Brasil, 698p., 2003;

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. p. 1020-1029.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B.; SARAVACOS, G. D. Rheological properties of fluid fruit and vegetable puree products: compilation of literature data. **International Journal of Food Properties**, 4(2), 179-200, 2001.

LANNES, S. C. S.; MEDEIROS, M. L.; AMARAL, R. L. **Formulação de chocolate de cupuaçu e reologia do produto líquido**. Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences vol. 38, n. 4, out.-dez., 2002.

LEWIS, M. J. **Propriedades de los alimentos y de los sistemas de procesado**. Zaragoza: Acribia, 494p, 1993.

LEWIS, M. J. **Propriedades de los alimentos y de los sistemas de procesado**. Zaragoza: Acribia, 494p, 1993;

LIRA, H. L. Microfiltração do soro de leite de búfala, utilizando membrana cerâmica como alternativa ao processo de pasteurização. **Dissertação de Mestrado**. 73p. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

MACEDO MP, Wechsler FS, Ramos AA, Amaral JB, Souza JC, Resende FD, Oliveira VJ. **Composição físico-química e produção do leite de búfala da raça Mediterrâneo no Oeste do estado de São Paulo**. *Rev Bras Zootec*, v.30 p.1084-1088, 2001.

MAGENIS, A. F. **Compositional and physical properties of yogurts manufactured from milk and whey cheese concentrated by ultrafiltration**, *Internacional Journal of Food Science and Technology*, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, pg. 560-568, 2006.

MANOHAR, B.; RAMAKRISHNA, P.; UDAYASANKAR, K. **Some physical properties of tamarind (*tamarindus indica* L.) juice concentrates**. *Journal of Food Engineering*, v. 13, n. 4, p. 241-258, 1991.

MARQUES, J.B.F., Filho, A.S.N., Silva et al., AOA., Barros, AVL., Camarão, AP, Martinez, GB., Ribeiro, H.L., Souza, H.E.M., Neto, J.M.S., Veiga, J.B., Filho, J.A.R., Teixeira, J.C., Souza, J.S., Cassiano, L.A.P., Peixoto, M.R.S., Araújo, M.S. **Búfalos, O produtor pergunta, a Embrapa responde** (Ed) Brasília: Embrapa, 2000 176p.

MCCLEMENTS, J. **Impact of electrostatic interactions on formation and stability of emulsions containing oil droplets coated by β -lactoglobulin-pectin complexes.** *Agric. Food Chem.*, v.55, p.475-485, 2007.

MERCALI, G.D. **Physical properties of acerola and blueberry pulps.** *Journal of Food Engineering, Essex*, V. 106, n. 4, p 283-289, 2011.

MINIM, L. A.; COIMBRA, J. S. R.; MINIM, V. P. R. **Influence of temperature and water and fat contents on the thermophysical properties of milk.** *Journal of Chemical & Engineering. Data*, Washington, v. 47, n. 6, p. 1488-1491, 2002.

MINIM, L. A.; TELIS, V. R. N.; MINIM, V. P. R.; ALCANTARA, L. A. P.; TELIS-ROMERO, J. **Thermophysical properties of lemon juice as affected by temperature and water content.** *J. Chem. Eng. Data*, 54, 2269-2272 (2009).

MOHSENIN, N. N. **Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials;** Gordon and Breach: New York (1980).

MOSQUIM, M. C. A. V. Propriedades funcionais do soro de queijo. In: **Encontro Digital de Tecnologia de Laticínios**, Viçosa, MG, 3, 1996.

MOURA, S. C. S. R., FRANÇA, V. C. L., LEAL, A. M. C. B. **Propriedades termofísicas de modelos similares a sucos – parte I**, *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v.23, n.1, p. 62-68, jan-abr, 2003.

MOURA, S., C., S., R.; FRANÇA, V., C., L.; LEAL, A., M., C., B. **Propriedades termofísicas de soluções- modelo Similares a Sucos – Parte II.** *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, Campinas, v.25, n.3, p. 454-459, jul.n/set. 2005.

MOURA, S.C.S. R.; Vitali, A.A; França, V.C.L. **Propriedades termofísicas de soluções modelo similares a creme de leite.** *Ciência e Tecnologia Alimentos*. v.21, n.2, p.209-215, 2001.

NADER FILHO, A.; SCHOCKEN-ITURRINO, R. P.S.; ROSSI JÚNIOR, O. D.; EÇA, F.A.D. **Características físico-químicas do leite bovino, bubalino e do produto da mistura de ambas as espécies.** *Artigos de Veterinária*, v. 2, n. 1, p. 95-106, 1986.

OLIVEIRA, S. D; CAMARGO, D; MACHADO, P. P.; BORGES, S. V. **Condutividade térmica do suco de laranja.** *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.3, n.1, p.101-104, 2001.

OLIVEIRA, V. M. **Formulação de bebida láctea fermentada com diferentes concentrações de soro de queijo, enriquecida com ferro: caracterização físico-**

química, análises bacteriológicas e sensoriais. Dissertação de Mestrado. 78p. Universidade Federal Fluminense. Niterói, Rio de Janeiro, 2006.

ORDÓÑEZ, J. A. Tecnologia de alimentos: **Componentes dos alimentos e processos.** Porto Alegre: Artmed Editora, 2005 a. Paulo: Lemos Editorial, 2000. 175p.

PELEGRINE, D.H. **Comportamento reológico das polpas de manga e abacaxi.** 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – FEA, UNICAMP, Campinas, 1999.

PIMENTEL, M.V.S.; BARBOSA, M.M.M.; ANDRADE, S.C. de; NASCIMENTO, W.G. do. **Evolução da bubalinocultura no Nordeste brasileiro: uma revisão bibliográfica.** In: Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão- JEPEX, 10, 2010, Garanhuns. Anais... Garanhuns: UFRPE- UAG, 2010.

RODRIGUES, C.F.C.; IAPICHINI, J.E.C.B.; LISERRE, A.M.; SOUZA, K.B. de; FACHINI, C.; REICHERT, R.H. **Oportunidades e desafios da bubalinocultura familiar da região sudoeste paulista.** Revista Tecnologia e Inovação Agropecuária. p.100-109,2008.

PINHEIRO, G. S. **Propriedades físicas, termofísicas e físico-químicas de purê de banana adicionados de açúcar,** Lavras, 2004, p, Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos), Universidade Federal de Lavras (UFLA).

RAHMAN, M. S. **Food Properties Handbook.** CRC Press, Inc., FL. (1995).

RAHMAN, M.S. **Mass-volume-area-related properties of food.** In: RAO, M. A.; RIZVI, M. D.; DATTA, A. K. Engineering properties of foods. New York, Inc, 2005.

RAHMAN, S. **Food properties handbook.** 2nd ed. New York: CRC Press, 1995. 522 p.

RAMOS, A.M.; IBARZ, A. **Density of juice and fruit as a function of soluble solids content and tempera- ture.** Journal of Food Engineering, v. 35, n. 1, p. 57-63, 1998.

RAO, M. A., & RIZVI, S. S. **Engineering properties of foods,** New York, Marcel Dekker, 1986.

RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods.** 3rd ed. Taylor & Francis Group, 2005. p.154.

RAO, M.A. **Rheology of liquid foods – a review.** Journal of Texture Studies, New York, v.8, n.2, p.135-168, 1977.

SANTOS A.S. e FERREIRA T.C. 2006. **Composição bromatológica da mussarela de leite de búfala (*Bubalus bubalis*)** produzida em Minas Gerais. Anais do XVI Congresso Nacional de Zootecnia – Zootec, Recife, PE.

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

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

SILVA, M.S.T, Júnior, J.B.L., Gonçalves, I. A. et al. **Programa de Incentivo a Criação de Búfalos por Pequenos Produtores**, 2003.

SILVA, N. M. C. **Propriedades termofísicas e comportamento reológico da polpa de jenipapo (*Genipa americana* L.)** 56p. Mestrado (Dissertação em Engenharia de Alimentos)– Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia-UESB, Itapetinga-Ba, 2008.

SILVA, N. M. C.; BONOMO, R. C. F.; RODRIGUES, L. B.; CHAVES, M. A.; FONTAN, R. C. I.; BONOMO, P.; LANDIM, L. B.; SAMPAIO, V. S. (2010). **Thermophysical characterization of genipap pulp.** Int. J. Food Eng. , 6 (3), article 1.

SILVA, S. B. **Propriedades Termofísicas de Polpa de Abacaxi.** 1997. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1997.

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. **Introducción a la Ingeniería de los alimentos.** Zagaroa: Acribia, 1998, 544p.

SOUZA, M. A.; BONOMO, R. C. F.; FONTAN, R. C. I.; MINIM, L. A.; COIMBRA, J. S. R.; BONOMO, P. **Thermophysical properties of umbu pulp.** Braz. J. Food Technol. 13, 219-225 (2010).

STEFFE, J.F. **Rheological methods in food process engineering.** 2. ed. Freeman Press, 1996. 412p.

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

TANG, Q.; MUNRO, P. A.; MCCARTHY, O. W. **Rheology of whey protein concentrate solutions as a function of concentration, temperature, pH and salt concentration.** Journal of Dairy Research, v. 60, p. 349-361, 1993.

TAVMAN, I. H.; TAVMAN, S. **Measurement of thermal conductivity of dairy products.** Journal of Food Engineering, Essex, v. 41, n. 2, p. 109-114, 1999.

TEIXEIRA, L.V; BASTIANETTO, E.; OLIVEIRA, D.A.A. Leite de búfala na indústria de produtos lácteos, **Rev Bras Reprod Anim**, Belo Horizonte, v.29, n.2, p.96-100, abril/jun. 2005.

TEIXEIRA, L.V; FONSECA, L.M; **Perfil físico-químico do soro de queijo mozzarella e minas padrão produzidos em várias regiões do estado de Minas Gérias,** Arq. Bras. Med. Vet. Zoot. N.1, p. 243-250, 2008.

TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V.R.N.; GABAS, A.L.; YAMASHITA, F. **Thermophysical Properties of Brazilian Orange Juice as Affected by temperature and Water Content.** Journal of Food Engineering. v. 38, p.27-40, 1998;

URBICAN, M. J.; LOZANO, J.E. **Thermal and Rheological Properties of Foodstuffs.** In: VALENTAS, K. J.; ROTSTEIN, E.; SINGH, R, P. Handbook

VAN DENDER, A.G.F.; MORENO, I.; GARCIA, S. Uso do creme de leite de búfala e de vaca na fabricação do queijo mascarpone. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**, v.43, n.259, p. 35-42, 1988.

VÉLEZ-RUIZ, J. F.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. **Effects of temperature and concentration on the rheology of concentrated milk.** Transactions of the ASAE, v. 40, p. 1113-1118, 1997.

VÉLEZ-RUIZ, J. F.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. **Rheological properties of concentrated milk as function of concentration, temperature and storage time.** Journal of Food Engineering, v. 35, p. 177-190, 1998.

VENTUROSO, R. C; ALMEIDA, K. E.; RODRIGUES, A. M.; DAMIN, M. R; OLIVEIRA, M. N. **Determinação da composição físico-química de produtos lácteos: estudo exploratório de comparação de resultados obtidos por metodologia oficial e por ultra-som.** Ver. Cienc. Farmacêutica. v. 43, n.4, out/dez, 2007.

VERRUMA, M. R.; SALGADO, J. M. **Avaliação Química do leite de búfala em comparação ao leite de vaca.** Sci. Agric., v.50,n. 3, p. 131-137, 1993.

VIDAL, J.R.M.B.; GASPARETTO, C.A.; GRANDIN, A. **Efeito da temperatura no comportamento reológico da polpa de manga.** Revista Ciências Exatas e Naturais, v.1, n.2, p.69-76, 2000.

VITALI, A. A.; RAO, M. A. **Flow Properties of low-pulp concentrated orange juice: effect of temperature and concentration.** Journal of Food Science, v. 49, n. 3, p. 882-888, 1984.

VITALI, A.A. **Comportamento reológico de purê de goiaba (Psidium guajava L.) em função da concentração e temperatura** . 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1981.

VITALI, A.A.; RAO, M.A. **Flow properties of low-pulp concentrated orange juice: effect of temperature and concentration.** Journal of Food Science, v.49, n.3, p.882-88, 1984.

VRIESMANN, L. C., **Polysaccharides from the pulp of cupuassu (Theobroma grandiflorum): structural characterization of a pectic fraction.** Carbohydrate Polymers, p. 2-4, 2008.