

***RODRIGO DIAS FLAUZINO***

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO TEOR DE  
GORDURA NOS PARÂMETROS REOLÓGICOS DO LEITE  
CONDENSADO E CREME DE LEITE**

São José do Rio Preto  
2007

***RODRIGO DIAS FLAUZINO***

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO TEOR DE  
GORDURA NOS PARÂMETROS REOLÓGICOS DO LEITE  
CONDENSADO E CREME DE LEITE**

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

Orientador: Prof. Dr. Javier Telis Romero.

São José do Rio Preto  
2007

**RODRIGO DIAS FLAUZINO**

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO TEOR DE  
GORDURA NOS PARÂMETROS REOLÓGICOS DO LEITE  
CONDENSADO E CREME DE LEITE**

COMISSÃO JULGADORA

TESE PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE

Presidente e Orientador.....

2º Examinador.....

3º Examinador.....

São José do Rio Preto, 25 de junho 2007.

**DADOS CURRICULARES**  
**RODRIGO DIAS FLAUZINO**

NASCIMENTO	07.10.1977
FILIAÇÃO	Caibar Dias Flauzino Daisi Maria Pereira Flauzino
1997/2001	Curso de Graduação Engenharia Mecânica Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
2004/2007	Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, nível de mestrado UNESP – São José do Rio Preto/SP

Aos meus pais, pelo apoio irrestrito e presença marcante em todos os momentos de minha vida. À Priscilla, pelo carinho, estímulo e compreensão constantes, pelas horas furtadas de sua companhia.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Javier Telis Romero, pela exímia orientação e pela irrestrita disponibilidade em auxiliar-me nos estudos e pesquisas para a realização deste trabalho. Por seu entusiasmo contagiante, apoio incondicional e entendimento de minha situação quando a vida profissional obrigou-me a mudar de cidade e estado.

Ao Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos (DETA) da Universidade Estadual Paulista – UNESP de S. J. Rio Preto, pela oportunidade de obter este título de tão grande valia em minha carreira.

À Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ana Lúcia Gabas, pela colaboração com informações úteis à elaboração dessa dissertação e ao Prof. Dr. Paulo José do Amaral Sobral, por ter disponibilizado as instalações de seu laboratório no campus da USP – FZEA de Pirassununga.

À Nestlé Brasil Ltda., em especial ao Durval Alexandre Pedro Silva, pela oportunidade concedida ao possibilitar a realização deste curso.

Aos professores integrantes da banca examinadora, Prof. Dr. José Francisco Lopes Filho e Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ana Lúcia Gabas, pelas pontuais observações e sugestões apresentadas.

À ex-acadêmica Dayana Moura Prata e à Dr<sup>ª</sup>. Izabel Cristina Freitas Moraes, pelo auxílio na medição de dados durante o processo de pesquisa.

À Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ana Lúcia Barreto Penna, que sempre disponibilizou as instalações de seu laboratório na UNESP de S. J. Rio Preto para a realização de minhas pesquisas.

À Priscilla Gerzoschkowitz, pelo seu trabalho de revisão e formatação do texto, bem como pela abdicção do tempo de nosso convívio para que eu pudesse desenvolver este trabalho, sempre me encorajando a seguir em frente.

Aos meus pais e exemplos de vida, Caibar Dias Flauzino e Daisi Maria Pereira Flauzino, pela sólida formação dada até minha juventude, que me proporcionou a continuidade nos estudos.

Por fim, meus agradecimentos a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>8</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>10</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>11</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>13</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>14</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>17</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
<b>3.1 Produtos Lácteos</b> .....	<b>18</b>
3.1.1 Creme de leite .....	18
3.1.1.1 Variedades de creme .....	18
3.1.1.2 Classificação do creme de leite de mesa .....	19
3.1.1.3 Processo de fabricação de creme de leite .....	20
3.1.2 Leite condensado .....	23
3.1.2.1 Processo de fabricação de leite condensado .....	24
<b>3.2 Reologia de Produtos Alimentícios</b> .....	<b>26</b>
3.2.1 Reologia de Fluidos Alimentícios .....	27
3.2.2 Classificação de Fluidos Não Newtonianos .....	29
3.2.3 Modelos Reológicos .....	31
3.2.4 Influência da temperatura no comportamento reológico dos fluidos .....	35
3.2.5 Influência da concentração de sólidos no comportamento reológico dos fluidos .....	37
3.2.6 Influência combinada da temperatura e do teor de gordura no comportamento reológico dos fluidos .....	40
<b>3.3 Equipamentos para medição dos parâmetros reológicos</b> .....	<b>41</b>
3.3.1 Reômetro de Cilindros Concêntricos .....	44
3.3.2 Reômetro Cone e Placa .....	46
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>48</b>
<b>4.1 Materiais</b> .....	<b>48</b>
4.1.1 Leite Condensado .....	48
4.1.2 Creme de Leite .....	49
<b>4.2 Métodos</b> .....	<b>49</b>
4.2.1 Preparação das amostras .....	49

4.2.1.1 Leite Condensado .....	49
4.2.1.2 Creme de Leite.....	49
4.2.2 Obtenção dos parâmetros reológicos.....	50
4.2.2.1 Leite Condensado .....	50
4.2.2.2 Creme de leite .....	50
4.2.3 Operação do reômetro .....	51
4.2.3.1 Leite Condensado .....	51
4.2.3.2 Creme de leite .....	52
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>5.1 Leite Condensado.....</b>	<b>53</b>
5.1.1 Modelo de Otswald-De-Waele .....	55
5.1.2 Influência da Temperatura nos parâmetros reológicos .....	59
5.1.3 Comportamento tixotrópico .....	64
<b>5.2 Creme de Leite.....</b>	<b>65</b>
5.2.1 Modelo de Newton .....	66
5.2.2 Modelo de Bingham .....	69
5.2.3 Influência da Temperatura nos parâmetros reológicos .....	74
5.2.3.1 Modelo de Newton .....	75
5.2.3.2 Modelo de Bingham .....	77
5.2.4 Influência do teor de gordura nos parâmetros reológicos .....	80
5.2.4.1 Modelo de Newton .....	80
5.2.4.2 Modelo de Bingham .....	82
5.2.5 Efeito combinado da temperatura e teor de gordura nos parâmetros reológicos do creme de leite .....	85
5.2.5.1 Comportamento Newtoniano.....	86
5.2.5.2 Comportamento Viscoplastico – Modelo de Bingham.....	87
5.2.5.2.1 Tensão de cisalhamento inicial .....	87
5.2.5.2.2 Viscosidade Plástica .....	88
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>90</b>
<b>7. SUGESTÕES.....</b>	<b>93</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1:	Etapas do Processo do Creme de Leite.....	20
Figura 3.2:	Etapas do Processo do Leite Condensado.....	24
Figura 3.3:	Comportamento reológico dos alimentos.....	28
Figura 3.4:	Tipos de Reômetros.....	43
Figura 3.5:	Reômetro de cilindros concêntricos.....	45
Figura 3.6:	Reômetro cone e placa.....	46
Figura 5.1:	Reogramas do Leite Condensado na tensão de cisalhamento máxima e na tensão de cisalhamento de equilíbrio.....	53
Figura 5.2:	Reograma do Leite Condensado com Temperatura de $T= 283$ K – Tensão de cisalhamento máxima e tensão de cisalhamento de equilíbrio .....	54
Figura 5.3:	Reograma do Leite Condensado com Temperatura de $T= 313$ K – Tensão máxima e tensão de equilíbrio.....	56
Figura 5.4:	Reogramas do Leite Condensado na tensão de cisalhamento máxima .....	58
Figura 5.5:	Reogramas do Leite Condensado na tensão de cisalhamento de equilíbrio .....	59
Figura 5.6:	Efeito da temperatura no índice de consistência do leite condensado – Tensão de Cisalhamento Máxima.....	60
Figura 5.7:	Efeito da temperatura no índice de consistência do leite condensado – Tensão de Cisalhamento de Equilíbrio.....	60
Figura 5.8:	Efeito da temperatura no índice de comportamento do leite condensado – Tensão de Cisalhamento Máxima.....	62
Figura 5.9:	Efeito da temperatura no índice de comportamento do leite condensado – Tensão de Cisalhamento de Equilíbrio.....	63
Figura 5.10:	Reograma do Leite Condensado com Temperatura de $T = 278$ K e $283$ K – Comportamento Tixotrópico.....	64
Figura 5.11:	Reograma do Creme de Leite com Temperatura de $T= 279,8$ K e teor de gordura igual a $10,2\%$ .....	67
Figura 5.12:	Ajuste para o modelo de Newton para o Creme de Leite em diferentes temperaturas e teor de gordura igual a $10,2\%$ .....	68

Figura 5.13: Reograma do Creme de Leite com Temperatura de $T = 275,4\text{K}$ e fração de gordura igual a 20,3% .....	70
Figura 5.14: Ajuste para o modelo de Bingham para o Creme de Leite em diferentes temperaturas e teor de gordura igual a 25,1% e temperaturas entre 275,4 K e 306,4 K.....	71
Figura 5.15: Ajuste para o modelo de Bingham para o Creme de Leite em diferentes temperaturas (275,4 K e 306,4 K) e teor de gordura igual a 20,3%.....	73
Figura 5.16: Ajuste para o modelo de Bingham para o Creme de Leite em diferentes temperaturas (275,4 K e 306,4 K) e teor de gordura igual a 30,6%.....	74
Figura 5.17: Efeito da temperatura na viscosidade do creme de leite com teores de gordura de 10,2% e 15,1%.....	75
Figura 5.18: Efeito da temperatura na viscosidade do creme de leite com teores de gordura de 20,3%, 25,1% e 30,6% .....	77
Figura 5.19: Efeito da temperatura na tensão inicial do creme de leite com teores de gordura de 20,3%, 25,1% e 30,6% .....	78
Figura 5.20: Efeito da temperatura na viscosidade plástica do creme de leite com teores de gordura de 20,3%, 25,1% e 30,6%.....	79
Figura 5.21: Efeito da fração de gordura na viscosidade do creme de leite na faixa de temperatura entre 313 K e 359,8 K .....	81
Figura 5.22: Efeito da fração de gordura na tensão inicial do creme de leite na faixa de temperatura entre 275,4 K e 306,4 K.....	83
Figura 5.23: Efeito da fração de gordura na viscosidade plástica do creme de leite na faixa de temperatura entre 275,4 K e 306,4 K .....	84
Figura 5.24: Influência da temperatura e fração de gordura na viscosidade do creme de leite – Comportamento Newtoniano .....	87
Figura 5.25: Influência da temperatura e fração de gordura na Tensão de Cisalhamento inicial do creme de leite – Comportamento Viscoplastico .....	88
Figura 5.26: Influência da temperatura e fração de gordura na Viscosidade Plástica do creme de leite – Comportamento Viscoplastico.....	89

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1:	Composição matéria prima – Leite Condensado .....	48
Tabela 4.2:	Composição matéria prima – Creme de leite .....	49
Tabela 5.1:	Faixa de medição dos parâmetros reológicos do Leite Condensado...	53
Tabela 5.2:	Parâmetros reológicos de Leite Condensado – Tensão de cisalhamento Máxima .....	57
Tabela 5.3:	Parâmetros reológicos de Leite Condensado – Tensão de cisalhamento de Equilíbrio .....	57
Tabela 5.4:	Parâmetros da Equação 3.6 – Tensão de Cisalhamento Máxima.....	61
Tabela 5.5:	Parâmetros da Equação 3.6 – Tensão de Cisalhamento de Equilíbrio	61
Tabela 5.6:	Parâmetros da Equação 3.7 – Tensão de Cisalhamento Máxima.....	63
Tabela 5.7:	Parâmetros da Equação 3.7 – Tensão de Cisalhamento de Equilíbrio	63
Tabela 5.8:	Faixa de medição dos parâmetros reológicos de Creme de Leite.....	65
Tabela 5.9:	Viscosidades do creme de leite em diferentes frações de gordura e temperaturas - Domínio Newtoniano .....	69
Tabela 5.10:	Parâmetros reológicos para o creme de leite em diferentes teores de gordura e temperatura - Domínio Viscoplastico (Bingham).....	72
Tabela 5.11:	Parâmetros da Equação de Arrhenius - Domínio Newtoniano.....	76
Tabela 5.12:	Parâmetros da Equação 3.7 – Domínio Viscoplastico (Bingham) .....	78
Tabela 5.13:	Parâmetros da Equação 3.7 – Domínio Viscoplastico (Bingham) .....	79
Tabela 5.14:	Parâmetros da Equação 3.9 – Domínio Newtoniano.....	82
Tabela 5.15:	Parâmetros da Equação 3.10 – Domínio Viscoplastico (Bingham) .....	83
Tabela 5.16:	Parâmetros da Equação 3.10 – Domínio Viscoplastico (Bingham) .....	85

## NOMENCLATURA

As dimensões são dadas em termos de massa (M), comprimento (L), tempo (t), temperatura (T) e adimensional (-).

$a$  = constante da equação 2.8, [ - ]

$A$  = constante da equação 2.10, 2.11 [ M. L<sup>-1</sup>. t<sup>n</sup> ]

$A$  = constante da equação 2.12, 2.13 [ M. L<sup>-1</sup>. t<sup>-1</sup> ]

$b$  = constante da equação 2.9 e 2.11, [ - ]

$B$  = constante da equação 2.10, 2.12 e 2.13 [ - ]

$C$  = concentração de sólidos, [ - ]

$E_a$  = energia de ativação, [M. L<sup>2</sup>. t<sup>-2</sup> ]

$K$  = índice de consistência – Modelo de Otswald-De-Waele, [ M. L. t<sup>n</sup> ]

$K_\infty$  = constante da Equação 2.7 - [ M. L<sup>-1</sup>. t<sup>-1</sup> ]

$K_H$  = índice de consistência – Modelo de Herschel Bulkley, [ M. L. t<sup>n</sup> ]

$M$  = torque [ M. L<sup>2</sup>. t<sup>-2</sup> ]

$n$  = índice de comportamento do fluido – Modelo de Otswald-De-Waele, [ - ]

$n$  = índice de comportamento do fluido – Modelo de Herschel Bulkley, [ - ]

$r^2$  = coeficiente de determinação

$R$  = constante universal dos gases ( $R = 1,98$  cal/mol K), [ M. L<sup>2</sup>. t<sup>-2</sup>. T<sup>-1</sup> ]

$T$  = temperatura absoluta do fluido, [ T ]

$X_G$  = fração de gordura, [ - ]

### **Letras Gregas**

$\eta$  = viscosidade do fluido, [ M. L<sup>-1</sup>. t<sup>-1</sup> ]

$\eta_a$  = viscosidade aparente do fluido, [ M. L<sup>-1</sup>. t<sup>-1</sup> ]

$\eta_a$  = viscosidade aparente do fluido – Equação de Arrhenius, [ M. L<sup>-1</sup>. t<sup>-1</sup> ]

$\eta_{\infty}$  = constante da Equação de Arrhenius 2.6, [ M. L<sup>-1</sup>. t<sup>-1</sup> ]

$\eta_{\infty}$  = constante da equação 2.8 e 2.9, [ M. L<sup>-1</sup>. t<sup>-1</sup> ]

$\eta_b$  = viscosidade plástica - Modelo de Bingham, [ M. L<sup>-1</sup>. t<sup>-1</sup> ]

$\sigma$  = tensão de cisalhamento, [ M. L<sup>-1</sup>. t<sup>-2</sup> ]

$\sigma_0$  = tensão de cisalhamento inicial – Modelo de Bingham, [ M. L<sup>-1</sup>. t<sup>-2</sup> ]

$\sigma_{0H}$  = tensão de cisalhamento inicial – Modelo de Herschel Bulkley, [ M. L<sup>-1</sup>. t<sup>-2</sup> ]

$\dot{\gamma}$  = taxa de deformação, [ t<sup>-1</sup> ]

$\Omega$  = velocidade angular, [ L. t<sup>-1</sup> ]

### **Sub-índices**

a = aparente

b = Bingham

0 = inicial

H = Herschel Bulkley

G = gordura

## RESUMO

Neste trabalho estudou-se a influência da temperatura (275,4 a 359,8 K) e teor de gordura (10,2% a 30,6%) nos parâmetros reológicos do creme de leite, como também a influência da temperatura (278 a 343 K) nos parâmetros reológicos do leite condensado. A caracterização reológica foi realizada com o auxílio de um reômetro rotacional do tipo cone e placa, localizado no DEA/FZEA/USP, e de um reômetro rotacional do tipo cone e placa, localizado no DETA/UNESP. Os dados experimentais foram ajustados aos modelos de Ostwald-De Waele, Bingham e Herschel-Bulkley, para determinação dos parâmetros reológicos.

Observou-se para o leite condensado, em toda faixa de temperatura de estudo (278 a 343 K), comportamento pseudoplástico, sem tensão inicial de escoamento, e neste caso os parâmetros reológicos foram ajustados de acordo com o modelo de Ostwald-De-Waele. Para o creme de leite, observou-se comportamento viscoplástico (Binghamiano), na faixa de temperatura entre 275,4 e 306,4 K nas concentrações de 20,3 a 30,6%, sendo, neste caso, os parâmetros reológicos ajustados de acordo com o modelo de Bingham. Para a faixa de temperatura entre 275,4 e 359,8 K nas concentrações de 10,2 a 20,3%, observou-se comportamento Newtoniano, sendo, neste caso, os parâmetros reológicos ajustados de acordo com o modelo de Newton. Além disso, para temperaturas acima de 313K, em todas as concentrações, foi observado comportamento Newtoniano.

Para os dois produtos, a influência da temperatura foi representada por uma função exponencial. Correlações simples foram utilizadas para analisar o efeito combinado da temperatura e da fração de gordura nos parâmetros reológicos do creme de leite.

---

Palavras-chave: Creme de Leite, Leite Condensado, Reologia, Tixotropia, Temperatura, Gordura, Parâmetros Reológicos.

## **ABSTRACT**

The rheological behavior of milk cream with different fat contents (10,2% to 30,6%) was studied at a wide range of temperatures (275,4 to 359,8 K), as also the rheological behavior of sweetened condensed milk at a wide range of temperatures (278 to 343K). The rheological characterization was made using a cone and plate rotational rheometer, located at DEA/FZEA/USP, and a rheometer of the type cone and plate, located in DETA/UNESP. The experimental data have been adjusted to the Ostwald-De Waele, Bingham and Herschel-Bulkley models, to determine the rheological parameters.

It was observed for sweetened condensed milk, in all the temperature bands, pseudoplastic behavior, without yield stress, and the rheological parameters have been adjusted the Ostwald-De-Waele model. For milk cream, it was observed viscoplastic behavior (Binghamian), in the temperature bands between 275,4 and 306,4 K at fat contents of 20,3% to 30,6%. The rheological parameters have been adjusted to the Bingham model. For the temperature bands between 275,4 and 359,8 K at fat contents of 10,2% to 20,3%, it was observed Newtonian behavior, and therefore the rheological parameters have been adjusted to the Newton model. Besides, for temperatures above 313K, in all concentrations, it was observed Newtonian behavior.

For the two products, the influence of the temperature was represented by an exponential function. Simple correlations were used to analyze the effect of the temperature and the fat fraction in the rheological parameters of the milk cream.

---

Key words: Milk Cream, Sweet Condensed Milk, Rheology, Thixotropy, Temperature, Fat, Rheological Parameters.

## 1. INTRODUÇÃO

O leite é um dos principais alimentos consumidos no mundo devido ao seu alto valor nutricional, sendo utilizado há mais de seis mil anos nas mais diversas formas pelos povos.

No Brasil, a produção de leite em 2005, segundo a Embrapa, foi de 25,0 bilhões de litros com um crescimento de 6,5% em relação ao ano anterior. Com a estabilização da economia na última década e com o aumento do poder de compra dos consumidores, outros produtos derivados do leite também vêm apresentando aumento em sua produção e consumo. Alguns produtos como o creme de leite, o iogurte em seus diversos tipos, leite condensado e queijos, se enquadram nestes produtos onde a demanda de consumo vem aumentando ao longo dos anos.

Devido ao aumento do consumo destes produtos ao longo dos anos, há uma preocupação crescente na obtenção de dados mais precisos de suas características termofísicas tanto para a otimização de processos como para a manutenção dos valores nutricionais e organolépticos destes produtos.

Embora existam diversos estudos das propriedades reológicas do leite, leite concentrado, queijos e iogurte (GUERRERO & ALZAMORA, 1997; VÉLEZ-RUIZ & BARBOSA-CÁNOVAS 1997; MOURA *et al*, 2001), o número de trabalhos envolvendo o creme de leite e o leite condensado em específico é bastante limitado e o estudo é baseado somente na influência da temperatura nas propriedades reológicas destes produtos. Kristensen *et al* (1997) estudaram a influência da temperatura e concentração no creme de leite, porém, a concentração utilizada no estudo foi de 38%, diferente dos produtos consumidos no Brasil, onde a concentração de gordura varia de 15% (creme light) até 25% de gordura (creme de leite tradicional). Acredita-se que a influência da concentração de gordura na

reologia seja tão importante quanto a influência da temperatura nos parâmetros reológicos e, conseqüentemente, no dimensionamento de equipamentos utilizados na fabricação destes produtos.

Sendo assim, a maior parte dos dados publicados sobre parâmetros reológicos destes produtos não são adequados ao projeto de equipamentos de processo para a fabricação dos mesmos, principalmente no desenvolvimento de trocadores de calor a placas utilizando fluidos não-Newtonianos (GUT, 2003). Quando, por falta de alternativas, são utilizados para esse fim, conduzem a projetos de equipamentos super ou subdimensionados, gerando perdas financeiras, podendo colocar em risco a segurança do produto quando se tratar de equipamentos de tratamento térmico.

Por esta razão, o objetivo deste trabalho foi a determinação dos parâmetros reológicos do creme de leite em função da temperatura e da concentração de gordura, bem como a determinação dos parâmetros reológicos do leite condensado em função da temperatura. A partir destes dados experimentais, foram feitas correlações simples que permitem a extrapolação de dados para situações reais encontradas na indústria de alimentos.

É importante salientar que este trabalho sobre o estudo das propriedades reológicas do creme de leite e do leite condensado faz parte de um estudo completo das propriedades termofísicas destes produtos e está sendo realizado em conjunto entre a UNESP – São José do Rio Preto, USP – FZEA e USP – Escola Politécnica.

## **2. OBJETIVOS**

1. Determinação dos parâmetros reológicos do leite condensado e ajuste dos dados experimentais aos modelos reológicos mais utilizados na Engenharia de Alimentos.
2. Estudo da influência da temperatura sobre os parâmetros reológicos do leite condensado e determinação de equações matemáticas para correlacionar os parâmetros reológicos do leite condensado em função da temperatura.
3. Determinação dos parâmetros reológicos do creme de leite e ajuste dos dados experimentais aos modelos reológicos mais utilizados na Engenharia de Alimentos.
4. Estudo da influência da temperatura sobre os parâmetros reológicos do creme de leite e determinação de equações matemáticas para correlacionar os parâmetros reológicos do creme de leite em função da temperatura.
5. Estudo da influência do teor de gordura sobre os parâmetros reológicos do creme de leite e determinação de equações matemáticas para correlacionar os parâmetros reológicos do creme de leite em função do teor de gordura.
6. Estudo da influência combinada da temperatura e do teor de gordura sobre os parâmetros reológicos do creme de leite e determinação de equações matemáticas para correlacionar os parâmetros reológicos do creme de leite em função da temperatura e do teor de gordura.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Produtos Lácteos

##### 3.1.1 Creme de leite

O creme de leite é uma emulsão de gordura em água, produto de composição muito similar à do leite integral, exceto pela alta quantidade de gordura de leite que é adicionada para caracterizar o tipo de creme a ser produzido, podendo ser descrito como o leite cujo soro foi removido, caracterizando-se por ser um produto lácteo rico em gordura, resultante da desnatação do leite.

De fato, a única diferença significativa entre o creme de leite e o leite integral é a proporção de gordura e soro, realçando-se no creme a gordura. A extensão deste realce depende da finalidade para a qual o creme é produzido, podendo refletir inclusive no nome dado ao produto.

O creme de leite é considerado um produto nobre, porém, na última década houve um aumento considerável no seu consumo, especialmente em virtude da estabilização da economia brasileira, que possibilitou o aumento do poder de compra dos consumidores. No Brasil, o consumo de creme de leite gira em torno de 90.000 ton/ano, sendo bastante utilizado em receitas salgadas, incorporado em molhos, tortas, estrogonofe, massas em geral e doces, como mousses, pavês, coberturas, recheios de sobremesas, com salada de frutas e até mesmo em cafés.

##### 3.1.1.1 Variedades de creme

- Creme de mesa: produto obtido em condições especiais e destinado ao consumo direto ou à aplicação em culinária.

- Creme de indústria: produto obtido e tratado para fins de fabricação de manteiga e outros produtos.

### 3.1.1.2 Classificação do creme de leite de mesa

A Portaria nº 146 de 07/03/1996 do Ministério da Agricultura estabelece que o produto seja classificado de acordo com seu conteúdo em matéria gorda, podendo designar-se:

- Creme de Leite ou simplesmente Creme (18% - 35%).
- Creme de baixo teor de gordura ou leve ou semicreme (10% - 18%).
- Creme de alto teor de gordura (> 35%).

A mesma Portaria ainda estabelece que o creme cujo teor de matéria gorda seja superior a 40% p/p poderá ser designado "duplo creme". O creme cujo conteúdo de matéria seja superior a 35% p/p poderá, opcionalmente, designar-se "creme para bater".

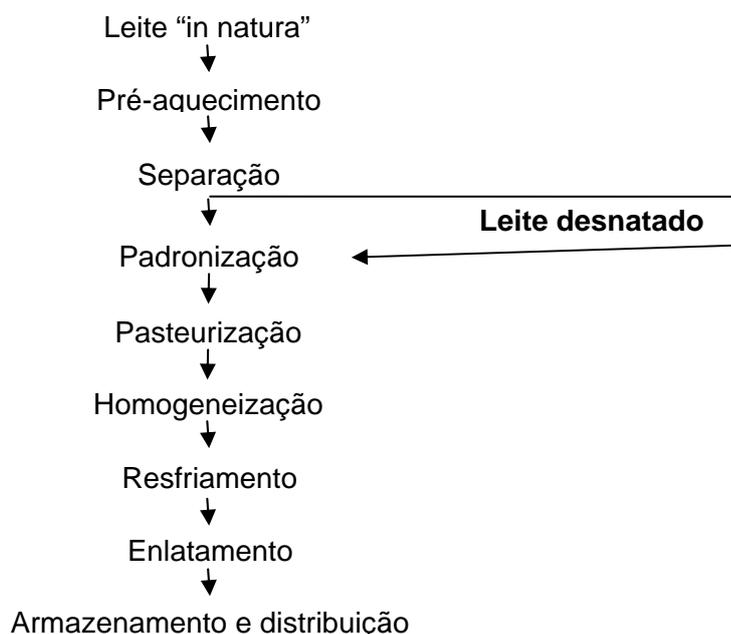
A legislação brasileira determina que o creme de leite integral deva conter 25% de gordura, contudo, em virtude da forte tendência do consumidor em optar por produtos com baixo teor de gordura, as diversas empresas diversificaram e aumentaram sua produção para agradar esse novo consumidor. Nesse sentido, foi desenvolvido o produto na versão *light*, com 15% de gordura, que a cada dia vem ocupando maior parcela do mercado de cremes.

Na verdade, a preocupação com uma dieta mais saudável não é atual. Estudos sobre a importância da composição química dos alimentos e seu valor nutricional datam de 1894, quando W. O. Atwater elaborou a primeira tabela de composição de alimentos, a qual possibilitou o desenvolvimento dos primeiros conceitos sobre a relação entre dieta e saúde da população, iniciando o estudo das necessidades nutricionais (ARAYA, 1997).

O creme de leite deve apresentar as seguintes características sensoriais: cor branca ou levemente amarelada; sabor característico, suave, não rançoso, nem ácido; sem sabores ou odores estranhos. Não é permitida a adição de nenhum aditivo ou de coadjuvantes para o creme pasteurizado. O creme esterilizado e o creme UHT poderão conter os agentes espessantes e/ou estabilizantes permitidos pela legislação, isoladamente ou em mistura, em quantidade total não superior a 0,5% (p/p) no produto final. Poderão conter, também, os sais estabilizantes permitidos, isoladamente ou em mistura, em quantidade total não superior a 0,2% (p/p) no produto final.

### 3.1.1.3 Processo de fabricação de creme de leite

O processo de fabricação do creme de leite pasteurizado constitui-se nas etapas de recepção do leite cru, filtração, resfriamento a 4° C, estocagem do leite em tanques isotérmicos, filtração/clarificação através de centrífugas, desnate e padronização, pasteurização, homogeneização, resfriamento, envase e armazenamento, como mostra a figura 3.1:



**Figura 3.1: Etapas do Processo do Creme de Leite**

As principais etapas do processo de fabricação do creme de leite são o desnatamento (separação) e a padronização. A separação consiste na concentração dos glóbulos de gordura do leite e posteriormente sua remoção do soro. O processo de separação é governado pela Lei de Stokes, ou seja, a separação é realizada através da aplicação de força centrífuga no leite, no interior de equipamentos denominados centrífugas. A separação da gordura ocorre em temperaturas entre 40°C - 60°C, faixa de temperatura que facilita a separação da gordura, minimizando os danos aos glóbulos de gordura e, conseqüentemente, à textura gordurosa (VARNAN e SUTHERLAND, 2001).

Após o processo de separação, temos o processo de padronização do creme, que consiste em ajustar, nas quantidades exatas, as matérias-primas que formam o produto. Geralmente esta padronização é realizada em tanques com temperatura controlada (5°C - 8°C), onde as matérias-primas são bombeadas, formando, portanto, a “receita” do produto. Um dos objetivos principais da padronização é evitar as variações nas composições químicas das matérias-primas, que podem variar dependendo do fabricante e da época do ano, como no caso do leite. Após a padronização do creme, entramos no processo de Homogeneização, que tem como objetivo principal prevenir a separação da gordura e soro no produto final.

O processo de homogeneização consiste em “quebrar” as partículas de gordura em partículas menores (1µm de diâmetro) através da passagem do leite padronizado em um orifício (válvula de homogeneização) muito pequeno, de forma a possibilitar a quebra das moléculas de gordura. Assim como no processo de separação, a homogeneização é facilitada com temperaturas entre 65°C, devido às moléculas de gordura estarem no estado líquido, o que possibilita a

homogeneização desejada. Além disto, para a homogeneização do creme, devido ao seu alto teor de gordura, é necessário utilizar altas pressões para a quebra das moléculas. Geralmente utilizam-se pressões de até 250 bar para obter a homogeneização desejada para creme de leite.

Além de evitar a separação do soro e gordura, o processo de homogeneização traz outros benefícios ao processo de fabricação do creme de leite (TETRA PAK, 2003):

- Produto com uma cor mais branca;
- Reduz a sensibilidade do produto à oxidação de gordura;
- Melhora a textura do produto.

Seguindo o processo de homogeneização, o creme segue para o tratamento térmico, que tem como objetivo eliminar os microorganismos presentes no produto e garantir a segurança alimentar ao consumidor. Dependendo do tratamento térmico empregado em sua fabricação, o creme é classificado como:

- Creme pasteurizado: o que foi submetido ao procedimento de pasteurização, mediante um tratamento térmico tecnologicamente adequado;
- Creme esterilizado: o que foi submetido ao processo de esterilização, mediante um tratamento térmico tecnologicamente adequado;
- Creme UHT: o que foi submetido ao tratamento térmico de ultra-alta temperatura, mediante procedimento tecnologicamente adequado.

Após a etapa de homogeneização o creme está pronto para o enlatamento ou envase, realizado em latas ou em embalagens do tipo longa-vida, dependendo do tipo de tratamento térmico recebido pelo produto.

O creme de leite deverá ser conservado, permanentemente, em câmara fria com temperatura inferior ou igual a 5°C, com o objetivo de manter suas

características, excetuando-se os cremes esterilizados e UHT, que poderão ser conservados à temperatura ambiente, somente necessitando de refrigeração após a abertura.

### 3.1.2 Leite condensado

O leite condensado é basicamente leite concentrado por evaporação, ao qual se adiciona açúcar com o intuito de reduzir o volume e aumentar a conservação, apresentando o produto uma cor amarelada e parecida com maionese.

O leite condensado é um produto bastante popular no Brasil, servido como acompanhamento de frutas e sorvetes, também muito utilizado no preparo de sobremesas em geral, tortas, mousses, caldas, vitaminas, coquetéis sofisticados (alcoólicos ou não) e, como novidade, atualmente está se incorporando ao preparo de diversas bebidas à base de café.

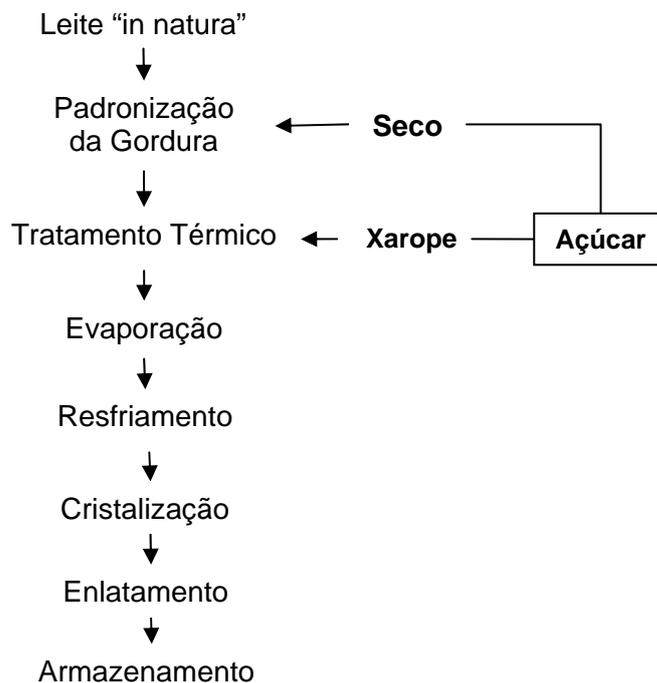
O consumo interno de leite condensado no Brasil gira em torno de 250.000 ton/ano. O leite condensado pode ser feito a partir de leite integral ou desnatado, ou a partir da reconstituição de leite em pó, butter-oil e água. Sua composição consiste em: 8% de gordura, 45% de açúcar, 20% de sólidos não-gordurosos e 27% de água.

A alta concentração de açúcar do produto aumenta a pressão osmótica a tal nível, que a maioria dos microorganismos são destruídos, não devendo essa concentração de açúcar ser maior que 64,5% dos sólidos totais. Ultrapassando-se esse percentual, ocorre a saturação do açúcar e a cristalização de parte dele, o que faz formar uma sedimentação e dá ao produto final uma característica de arenosidade, característica essa indesejada ao produto.

O produto geralmente é acondicionado em tanques para utilização industrial em larga escala (fábricas de sorvete e chocolate), em latas para venda no varejo em temperatura ambiente, e também em embalagens assépticas (UHT).

### 3.1.2.1 Processo de fabricação de leite condensado

O processo de fabricação do leite condensado constitui-se nas etapas de recepção do leite cru, filtração, resfriamento a 4° C, estocagem do leite em tanques isotérmicos, padronização da gordura e teor de sólidos, clarificação através de centrífugas, adição de açúcar (via úmida ou via seca), pasteurização, evaporação, resfriamento, estocagem e cristalização, envase e armazenamento, como mostra a figura 3.2:



**Figura 3.2: Etapas do Processo do Leite Condensado**

Após a recepção, filtração e resfriamento do leite *in natura*, o leite segue para o processo de padronização da gordura e da matéria sólida, processo similar ao descrito anteriormente para o creme de leite. Após a etapa da

padronização, o leite segue para a etapa de tratamento térmico, para destruição de microorganismos e estabilização das proteínas do leite, sendo o leite termicamente tratado bombeado para o evaporador, onde é concentrado. A etapa de tratamento térmico é extremamente importante para a fabricação de leite condensado, pois a combinação tempo/temperatura nesta etapa do processo influencia diretamente na viscosidade do produto durante a estocagem (TETRA PAK, 2003). Se o tratamento térmico for brando (82°C/10 minutos, por exemplo), podemos obter um gel e conseqüentemente um produto com alta viscosidade. Se o produto desejado for de baixa densidade, a combinação tempo/temperatura a ser utilizada pode ser de 116°C/30 segundos.

A solução de açúcar geralmente é adicionada ao concentrado antes da evaporação, podendo o açúcar ser adicionado via seca (antes do tratamento térmico), também antes da evaporação, na correta proporção calculada com relação à quantidade de matéria sólida.

Após a etapa de tratamento térmico, o leite segue para o processo de evaporação, para a remoção de água existente no leite. Este processo ocorre em um equipamento denominado evaporador (geralmente evaporadores de filme descendente de múltiplos efeitos), onde o leite, sob vácuo, passa no interior dos tubos do evaporador onde ocorre a ebulição do leite e, conseqüentemente, a remoção da água.

Após a concentração de leite no processo de evaporação, o produto segue para resfriamento e cristalização da lactose, etapas mais importantes no processo de fabricação de leite condensado.

A água presente no leite condensado pode reter somente metade da lactose presente na solução. A outra metade, então, irá precipitar na forma de

cristais. Se a lactose livre se precipitar, cristais de açúcar irão crescer e teremos desta forma cristais de elevado tamanho (maiores que  $10 \mu\text{m}$ ), que trarão ao produto características indesejadas na maioria das aplicações. Para evitar a formação de grandes cristais, o processo de cristalização deve ser muito controlado, de forma que a lactose forme diversos pequenos cristais na solução supersaturada sob temperaturas normais de armazenamento ( $15^{\circ}\text{C}$ - $25^{\circ}\text{C}$ ). Desta forma, o leite condensado que sai do processo de evaporação a uma temperatura de aproximadamente  $60^{\circ}\text{C}$  deve ser rapidamente resfriado até a temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  -  $30^{\circ}\text{C}$  e, nesta etapa, é necessário adicionar pequenos e finos cristais de lactose (aproximadamente 0,05% do total de produto), que formarão os pequenos cristais na solução.

Após o resfriamento e adição de lactose, o produto é estocado em tanques com temperatura controlada, até que o processo de cristalização seja completado. Este processo pode demorar até 12 h e após esta etapa o produto pode ser enlatado e estocado em temperatura ambiente.

### 3.2 Reologia de Produtos Alimentícios

Reologia pode ser definida como a ciência da deformação e escoamento da matéria, ou seja, é o estudo da maneira cujos materiais respondem à aplicação de alguma tensão ou deformação (STEEFE, 1996 e TABILO-MUNIZAGA & BARBOSA-CÁNOVAS, 2005).

Como todos os materiais possuem propriedades reológicas, além da Engenharia de Alimentos, o estudo da reologia é relevante para muitas áreas de estudo, tais como Geologia, Tribologia, Bioengenharia, Indústria Farmacêutica, entre outras.

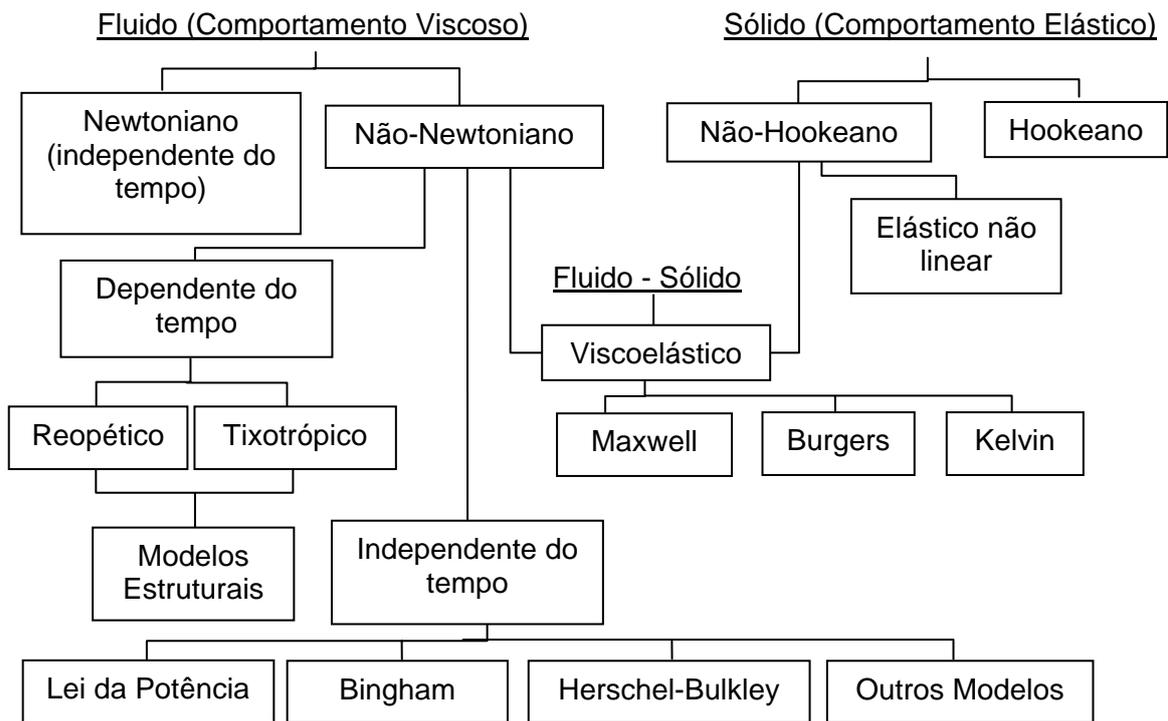
Segundo Bourne (1992), Steefe (1996) e Guerrero & Alzamora (1997), o conhecimento das propriedades reológicas dos alimentos é essencial para:

- Projeto de equipamentos como tubulações, bombas, extrusoras, misturadores, trocadores de calor, evaporadores, etc;
- Desenvolvimento de produtos ou ingredientes;
- Controle de qualidade do produto final ou controle intermediário;
- Definição de vida de prateleira do produto;
- Avaliação da textura do alimento e comparação com dados sensoriais.

Devido à complexidade natural dos alimentos, tendo grande variação em sua estrutura e composição, é necessário classificar os alimentos de acordo com seu comportamento (SHERMAN, 1970). Por exemplo, comportamentos reológicos de leite, manteiga e sucos de frutas são estudados separadamente de outros produtos como pão, alimentos minimamente processados, etc.

### 3.2.1 Reologia de Fluidos Alimentícios

Os fluidos, do ponto de vista reológico, podem ser classificados em diferentes categorias, como mostra a figura 3.3:



**Figura 3.3: Comportamento reológico dos alimentos**

A viscosidade ( $\eta$ ) pode ser utilizada para classificar o comportamento de diversos fluidos. A viscosidade de fluidos Newtonianos é influenciada somente pela temperatura do fluido e sua composição, ou seja, são fluidos cuja relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade é constante. Exemplos de fluidos que possuem este comportamento são: água, leite, óleos, solventes orgânicos, soluções de sacarose, soluções de baixo peso molecular e gases, entre outros (RAO, 1994).

Fluidos que não possuem o comportamento Newtoniano são chamados de fluidos não-Newtonianos, onde está classificada a maioria dos alimentos. Para os fluidos não-Newtonianos, a viscosidade é função da taxa de deformação, o que significa que, para cada taxa de deformação aplicada ao fluido, temos uma tensão de cisalhamento (TABILO-MUNIZAGA & BARBOSA-CÁNOVAS, 2005), ou seja, as propriedades dos fluidos não-Newtonianos são influenciadas

também pela taxa de deformação. Ao invés de possuírem viscosidade Newtoniana ( $\eta$ ), a viscosidade aparente ( $\eta_{ap}$ ) é utilizada em uma determinada taxa de deformação. Para o dimensionamento de equipamentos, o conceito de viscosidade aparente não é muito utilizado, já que a viscosidade varia com a taxa de deformação. Entretanto, este conceito é muito utilizado nas indústrias para controle de qualidade (ADORNO, 1997).

### 3.2.2 Classificação de Fluidos Não Newtonianos

Os fluidos não-Newtonianos são divididos em duas categorias: dependentes do tempo e independentes do tempo (HOLDSWORTH, 1971 e RAO, 1994). Para os fluidos classificados como independentes do tempo, à temperatura constante, a viscosidade aparente ( $\eta_{ap}$ ) depende somente da taxa de deformação, porém, para os fluidos dependentes do tempo, a viscosidade aparente ( $\eta_{ap}$ ) também depende da duração da taxa de deformação (RAO, 1994).

A grande maioria dos fluidos não-Newtonianos é independente do tempo e denomina-se pseudoplástico, quando a taxa de acréscimo na tensão de cisalhamento diminui com o aumento da taxa de deformação. Essa classe de fluidos é representada por produtos como polpas e sucos concentrados de frutas (TELIS-ROMERO, 1992; ADORNO, 1997; TELIS-ROMERO *et al*, 1998), e leite concentrado (VÉLEZ-RUIZ & BARBOSA-CÁNOVAS, 1998).

De acordo com Holdsworth (1971), o comportamento pseudoplástico pode ser explicado pela modificação da estrutura de cadeias longas de moléculas com o aumento do gradiente de velocidade. Estas cadeias tendem a se alinhar paralelamente às linhas de corrente, diminuindo a resistência ao escoamento. Em altos gradientes de velocidade, esses fluidos tendem a um comportamento

Newtoniano, devido à completa orientação das cadeias ou partículas, entretanto, para baixos gradientes de velocidade, esses fluidos também apresentam comportamento Newtoniano, devido à completa distribuição ao acaso da orientação das partículas.

Uma outra categoria de fluidos não-Newtonianos independentes do tempo são chamados dilatantes, que exibem um comportamento oposto ao pseudoplástico, ou seja, a taxa de acréscimo da tensão de cisalhamento aumenta com o aumento da taxa de deformação. Este tipo de fluido é raramente encontrado, e como exemplo de fluidos com este comportamento temos alguns tipos de mel, suspensão de amido, entre outros (RAO, 1994 e CABRAL, 2000).

O fenômeno da dilatância pode ser explicado pela existência de um sistema de partículas densamente empacotado. Se este sistema for submetido ao cisalhamento, deverá ocorrer uma certa separação das partículas antes do deslizamento entre elas. Como consequência, ocorrerá um aumento global do volume. À medida que as tensões aumentam, as partículas passam a interagir entre si, aumentando a viscosidade do fluido (CABRAL, 2000).

Além destes dois tipos de classificação, alguns fluidos não-Newtonianos apresentam tensão inicial de escoamento, ou seja, o escoamento se dá depois de aplicada uma tensão inicial sob a qual o escoamento se inicia. Enquadram-se nesta classificação as soluções concentradas de polímeros ou dispersões concentradas de proteínas.

Os fluidos não-Newtonianos dependentes do tempo podem ser subdivididos em tixotrópicos e reopéticos. Para os fluidos denominados tixotrópicos, a viscosidade diminui com o tempo a uma taxa de deformação fixa, já para os fluidos denominados reopéticos ocorre o inverso, pois a viscosidade aumenta. Alguns

autores classificam como fluidos tixotrópicos a maionese (TIU E BORGER, 1974; FIGONI E SHOEMAKER, 1983), o Ketchup (STEEFE, 1996) e o leite condensado (PRENTICE, 1992).

Segundo Tabilo-Munizaga & Barbosa-Cánovas (2005), o comportamento tixotrópico dos fluidos significa a redução da resistência da estrutura dos alimentos durante a fase em que há a tensão aplicada, mas uma completa recuperação da estrutura durante a fase em que não há mais tensão sendo aplicada ao fluido (fase de descanso do fluido). Além disto, a tixotropia significa que a história do escoamento é importante para a determinação da viscosidade em processos como mistura, escoamento em tubos, centrifugação, entre outros, onde a viscosidade continua a variar durante um longo período de tempo. Ao contrário dos fluidos tixotrópicos, os fluidos denominados reopéticos têm um aumento da resistência da estrutura durante a fase em que há tensão aplicada e a conseqüente recuperação da estrutura (e da viscosidade) após a cessão da tensão aplicada.

Uma classe mais complicada e que não se enquadra na classificação anterior são os fluidos viscoelásticos, que apresentam um comportamento híbrido entre o dos sólidos Hookeanos e o dos fluidos puramente viscosos, isto é, ao mesmo tempo em que uma parte da energia recebida durante a sua deformação é armazenada, como nos sólidos elásticos, outra parte é dissipada, como ocorre nos fluidos puramente viscosos.

### 3.2.3 Modelos Reológicos

Os modelos reológicos podem relacionar propriedades reológicas de um fluido com grandezas práticas como concentração, temperatura, pH, índice de maturação e etc. Este conhecimento é indispensável no dimensionamento de equipamentos, processos, controle de qualidade e controle de processo. Dessa

forma, é de extrema importância a disponibilidade de equações matemáticas que possam relacionar estas grandezas para a realização destas atividades.

Bird *et al* (1960) definiram que as propriedades reológicas dos fluidos podem, em geral, ser definidas pela equação:

$$\sigma = f(\dot{\gamma}), \quad (3.1)$$

que relaciona a tensão de cisalhamento,  $\sigma$ , aplicada ao fluido, com o gradiente de velocidade,  $\dot{\gamma}$ , portanto, pode-se dizer que a principal utilidade de um modelo reológico é a representação matemática entre o valores experimentais de tensão de cisalhamento  $\sigma$  e taxa de deformação  $\dot{\gamma}$ .

De modo geral, os modelos reológicos são isotérmicos, ou seja, descrevem o comportamento do fluido a uma temperatura fixa, e os parâmetros do modelo são relacionados com a temperatura através de relações específicas. Entretanto, alguns modelos já incluem as relações dos parâmetros reológicos com a temperatura e, portanto, são denominados como modelos não-isotérmicos.

- Modelo Newtoniano: Como já dito anteriormente, fluidos denominados Newtonianos são os fluidos que possuem a relação constante entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento, para determinadas condições de pressão e temperatura. Portanto, este comportamento é descrito matematicamente pela equação:

$$\sigma = \eta \dot{\gamma}, \quad (3.2)$$

onde:  $\sigma$  é a tensão de cisalhamento (Pa);

$\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação ( $s^{-1}$ );

$\eta$  é a viscosidade do fluido (Pa.s), no Sistema Internacional de unidades (SI).

- Modelo Lei da Potência: Um dos modelos reológicos mais utilizados para descrever o comportamento dos fluidos não-Newtonianos em amplas faixas de taxas de deformação é o modelo de Ostwald-De-Waele ou modelo Lei da Potência, descrito pela equação:

$$\sigma = K \left( \dot{\gamma} \right)^n, \quad (3.3)$$

onde:  $\sigma$  é a tensão de cisalhamento (Pa);

$\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação ( $s^{-1}$ );

$K$  é o índice de consistência ( $Pa \cdot s^n$ );

$n$  é o índice de comportamento do fluido, adimensional, no Sistema Internacional de unidades (SI).

O parâmetro  $n$  pode assumir valores menor, igual ou maior que a unidade. Para o caso em que o valor de  $n$  é igual à unidade, o modelo da Lei da Potência é similar ao modelo Newtoniano, portanto o valor de  $K$  é o valor da viscosidade do fluido.

Para fluidos pseudoplásticos, o índice de comportamento do fluido  $n$  é menor que a unidade, e quanto menor o seu valor, mais intenso é o comportamento pseudoplástico. Segundo Adorno (1997), o valor de  $n$  decresce com o aumento do conteúdo de sólidos, enquanto o valor de  $n$  é pouco afetado pela variação de temperatura.

Quando o valor de  $n$  é maior que a unidade, o fluido é classificado como dilatante, ou seja, a taxa de aumento da tensão de cisalhamento aumenta com o aumento da taxa de deformação.

Diversos cálculos relacionados com fluidos não-Newtonianos baseiam-se no modelo Lei da Potência, em virtude de sua simplicidade no cálculo

dos parâmetros reológicos do fluido (ADORNO, 1997; VÉLEZ-RUIZ & BARBOSA-CÁNOVAS, 1998; TELIS-ROMERO *et al*, 2006).

- Modelo de Bingham: Existem fluidos independentes do tempo que não podem ser representados pelo modelo Lei da Potência, pois, devido à sua estrutura interna, que impede a deformação, necessitam de uma tensão inicial para o início do escoamento. Abaixo desta tensão, o material exibe a característica de um sólido e permanece em repouso, só começando a escoar com tensão acima do valor da tensão inicial. A representação matemática dos fluidos que possuem este comportamento é dada pela equação:

$$\sigma - \sigma_0 = \eta_b \dot{\gamma}, \quad (3.4)$$

onde:  $\sigma$  é a tensão de cisalhamento (Pa);

$\sigma_0$  é a tensão de cisalhamento inicial (Pa);

$\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação ( $s^{-1}$ );

$\eta_b$  é a viscosidade plástica de Bingham (Pa.s), no Sistema Internacional de unidades (SI).

- Modelo de Herschel-Bulkley: Análogo ao modelo de Bingham, este modelo é uma extensão do modelo Lei da Potência, utilizado para fluidos com tensão inicial de escoamento. A representação matemática dos fluidos que possuem este comportamento é dada pela equação:

$$\sigma - \sigma_{0H} = K_H \left( \dot{\gamma} \right)^n, \quad (3.5)$$

onde:  $\sigma$  é a tensão de cisalhamento (Pa);

$\sigma_{0H}$  é a tensão de cisalhamento inicial (Pa);

$\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação ( $s^{-1}$ );

$K_H$  é o índice de consistência ( $Pa \cdot s^n$ );

$n$  é o índice de comportamento do fluido, adimensional, no Sistema Internacional de unidades (SI).

O modelo de Herschel-Bulkley é muito útil porque os comportamentos Newtoniano ( $\sigma_{0H}=0$  e  $n=1$ ), Lei da Potência ( $\sigma_{0H}=0$ ) e de Bingham ( $n=1$ ) podem ser considerados casos particulares do modelo de Herschel-Bulkley.

Telis-Romero *et al* (2006) utilizaram este modelo para descrever o comportamento reológico da gema de ovo. Vélez-Ruiz & Barbosa-Cánovas (1998) utilizaram na determinação das propriedades reológicas de leite concentrado e Guerrero & Alzamora (1997) para purê de banana.

Além destes modelos, acima descritos, outros autores desenvolveram modelos matemáticos para descrever o comportamento reológico de fluidos, como, por exemplo, Casson, que desenvolveu um modelo adotado como oficial para descrever o escoamento de chocolate, adotado pela *International Office of Cocoa and Chocolate*, e Mizrahi e Berk (1972), que desenvolveram um modelo que representa melhor o comportamento de suco de laranja concentrado.

#### 3.2.4 Influência da temperatura no comportamento reológico dos fluidos

Os alimentos fluidos são submetidos a diversas temperaturas durante o processamento, armazenamento, transporte e consumo. Por esta razão, as propriedades reológicas são estudadas em função da temperatura (RAO, 1995; BARBOSA-CÁNOVAS & VÉLEZ-RUIZ, 1997).

Em geral, o efeito da temperatura na viscosidade ( $\eta$ ) ou na viscosidade aparente ( $\eta_{ap}$ ) pode ser representado pela equação de Arrhenius:

$$\eta_a = \eta_\infty \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right), \quad (3.6)$$

onde:  $\eta_a$  é a viscosidade aparente do fluido (Pa.s);

$\eta_\infty$  é a constante empírica (Pa.s);

$E_a$  é a energia de ativação (cal/mol);

R é a constante universal dos gases (cal/mol.K);

T é a temperatura absoluta do fluido (K), no sistema internacional de unidades (SI).

Como pode ser verificado pela equação, o aumento da temperatura tem o efeito de diminuir a viscosidade do fluido. Já a ordem de grandeza da energia de ativação indica a dependência da viscosidade de um fluido à temperatura, assim, fluidos com alta energia de ativação apresentam grande variação na viscosidade em função da temperatura e vice-versa.

Uma revisão da literatura realizada por Vitalli (1981) sobre a influência da temperatura nos alimentos fluidos mostrou que, de uma forma geral, os valores de energia de ativação encontram-se na faixa entre 1,5 a 15 Kcal/mol. Essa variação se deve à faixa de temperatura considerada, à influência do teor de sólidos solúveis e em suspensão, como também à presença de polímeros.

O efeito da temperatura também pode ser estudado usando o índice de consistência (K) do modelo de Otswald De-Waele (Lei da Potência) e de outros modelos como o modelo de Herschel-Bulkley e o modelo de Bingham. A equação utilizada é descrita abaixo, análoga à equação de Arrhenius (equação 3.6):

$$K, n, \sigma_0 = K_\infty \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right), \quad (3.7)$$

onde:  $K, n, \sigma_0$  são parâmetros reológicos;

$K_{\infty}$  é a constante empírica;

$E_a$  é a energia de ativação (cal/mol);

R é a constante universal dos gases (cal/mol.K);

T é a temperatura absoluta do fluido (K), no sistema internacional de unidades (SI).

Barbosa-Cánovas & Vélez-Ruiz (1997) determinaram o efeito da temperatura sobre as propriedades reológicas do leite concentrado e encontraram uma variação da energia de ativação entre 2,42 e 11,8 kcal/mol, e o efeito no índice de comportamento do fluido foi mínimo, o que comprova outros estudos realizados por outros pesquisadores como Rao *et al* (1981) e Reddy & Datta (1994).

Holdsworth (1971) examinou os valores da energia de ativação para sucos e purês de frutas pseudoplásticos, concluindo que quanto menor o valor do índice de comportamento do fluido, menor é o efeito da temperatura na viscosidade do fluido.

De uma maneira geral, o aumento da temperatura resulta na diminuição do valor do índice de consistência (K), enquanto que o valor do índice de comportamento do fluido (n) é pouco afetado com a temperatura (TELIS-ROMERO, 1992).

### 3.2.5 Influência da concentração de sólidos no comportamento reológico dos fluidos

De acordo com Rao (1999), Adorno (1997) e Cabral (2000), a viscosidade aumenta com o aumento da concentração de sólidos solúveis ou insolúveis para um determinado fluido, e se deve a diversos aspectos, como o aumento do atrito entre as moléculas devido ao aumento da interação molecular,

formato das partículas, efeitos eletroviscosos, entre outros, sem existir uma teoria para prever estes comportamentos devido à complexidade destes sistemas.

Em geral, a dependência da viscosidade aparente com a concentração de sólidos solúveis e insolúveis pode ser representada por dois tipos de relações matemáticas, potencial e exponencial.

A relação potencial é escrita pela equação abaixo:

$$\eta_a = \eta_\infty C^a, \quad (3.8)$$

onde:  $\eta_a$  é a viscosidade aparente do fluido (Pa.s);

$\eta_\infty$  e  $a$  são parâmetros da equação (Pa.s);

$C$  é a concentração de sólidos, adimensional, no sistema internacional de unidades (SI).

A segunda relação matemática que descreve o efeito da concentração de sólidos é a relação exponencial:

$$\eta_a = \eta_\infty \exp(b * C), \quad (3.9)$$

onde:  $\eta_a$  é a viscosidade aparente do fluido (Pa.s);

$\eta_\infty$  e  $b$  são parâmetros da equação (Pa.s);

$C$  é a concentração de sólidos, adimensional, no sistema internacional de unidades (SI).

Vélez-Ruiz & Barbosa-Cánovas (1998) utilizaram a relação exponencial para estudar a influência da concentração de sólidos em leite concentrado, onde obtiveram bons resultados ( $r^2 = 0,94$ ) para o ajuste dos parâmetros da equação. Chang & Hartel (1997) estudaram leite desnatado concentrado a baixas temperaturas, utilizando ambas as equações potencial e exponencial para descrever o efeito da concentração na viscosidade de leite

desnatado e obtiveram bons resultados para o ajuste das duas equações ( $r^2 > 0,861$ ), porém, o modelo exponencial apresentou melhor coeficiente de determinação ( $r^2 > 0,961$ ).

Como pode ser verificado pela equação, o aumento da concentração de sólidos tem o efeito de aumentar a viscosidade do fluido para fluidos Newtonianos. Para fluidos não-Newtonianos o aumento da concentração de sólidos influencia no aumento do valor do índice de consistência (K) para os fluidos descritos pelo modelo da Lei da Potência, e nos valores da viscosidade plástica ( $\eta_b$ ) para fluidos descritos pelo modelo de Bingham (IBARZ *et al*, 1995; ADORNO, 1997), porém, o aumento da concentração de sólidos tem pouca influência nos valores do índice de comportamento do fluido (n) (ADORNO, 1997).

O efeito da concentração de sólidos nos parâmetros reológicos de fluidos não-Newtonianos, podem ser representados por equações análogas às equações 3.8 e 3.9, como descrito abaixo:

Relação exponencial:

$$K, \sigma_0, \eta_B = A * C^B, \quad (3.10)$$

onde:  $K, \sigma_0, \eta_B$  são parâmetros reológicos dos fluidos não-Newtonianos;

A e B são parâmetros da equação;

C é a concentração de sólidos.

Relação exponencial:

$$K, \sigma_0, \eta_B = A * \exp(b * C), \quad (3.11)$$

onde:  $K, \sigma_0, \eta_B$  são parâmetros reológicos dos fluidos não-Newtonianos;

A e b são parâmetros da equação;

C é a concentração de sólidos.

### 3.2.6 Influência combinada da temperatura e do teor de gordura no comportamento reológico dos fluidos

Do ponto de vista de Engenharia, ou seja, para o dimensionamento de equipamentos de bombeamento, evaporação, secagem, entre outros, é importante e de muita utilidade se obter uma única expressão que permita descrever o efeito combinado da temperatura e da concentração de sólidos no comportamento dos parâmetros reológicos (PAGAN & IBARZ, 1999; GINER *et al*, 1996).

Portanto, com o objetivo de se estudar o efeito combinado da temperatura e concentração de sólidos, foram propostos modelos combinados, ou seja, modelos resultantes do produto individual das contribuições de cada parâmetro, de acordo com a equação abaixo:

$$\eta = A * C^B \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right), \quad (3.12)$$

onde: A e B são parâmetros da correlação;

C é a concentração de sólidos, adimensional;

E<sub>a</sub> é a energia de ativação (cal/mol);

R é a constante universal dos gases (cal/mol.K);

T é a temperatura do fluido (K), no sistema internacional de unidades (SI).

Da mesma forma que para a equação acima, é possível combinar as equações do tipo Arrhenius (equação 3.6) com a equação do tipo exponencial, também utilizada para descrever a influência da concentração de sólidos nos parâmetros reológicos, como mostra a equação 3.13 abaixo:

$$\eta = A * \exp(B * C) \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right), \quad (3.13)$$

onde: A e B são parâmetros da correlação;

C é a concentração de sólidos, adimensional;

$E_a$  é a energia de ativação (cal/mol);

$R$  é a constante universal dos gases (cal/mol.K);

$T$  é a temperatura do fluido (K), no sistema internacional de unidades (SI)..

Através da análise das equações (3.12) e (3.13), pode-se observar que o efeito das duas variáveis (Temperatura e Concentração) são opostos, ou seja, o aumento da concentração causa um aumento nos parâmetros reológicos como viscosidade ( $\eta$ ), índice de consistência ( $K$ ), viscosidade plástica ( $\eta_b$ ), entre outros parâmetros, enquanto o aumento da temperatura causa o efeito contrário, ou seja, a diminuição dos valores destes parâmetros (VÉLEZ-RUIZ & BARBOSA-CÁNOVAS,1998).

Estas equações foram muito utilizadas por diversos autores como (IBARZ, 1996), (GINER *et al*, 1996), (GUERRERO & ALZAMORA, 1997), (VÉLEZ-RUIZ & BARBOSA-CÁNOVAS,1998). Adorno (1997) utilizou estas mesmas correlações combinadas para estudar a influência combinada da temperatura e fração de água nos parâmetros reológicos dos sucos de manga, maracujá, goiaba e mamão. Telis-Romero *et al* (1999) utilizaram esta correlação para estudar os parâmetros reológicos do suco de laranja, ambos obtendo resultados satisfatórios com bons coeficientes de determinação.

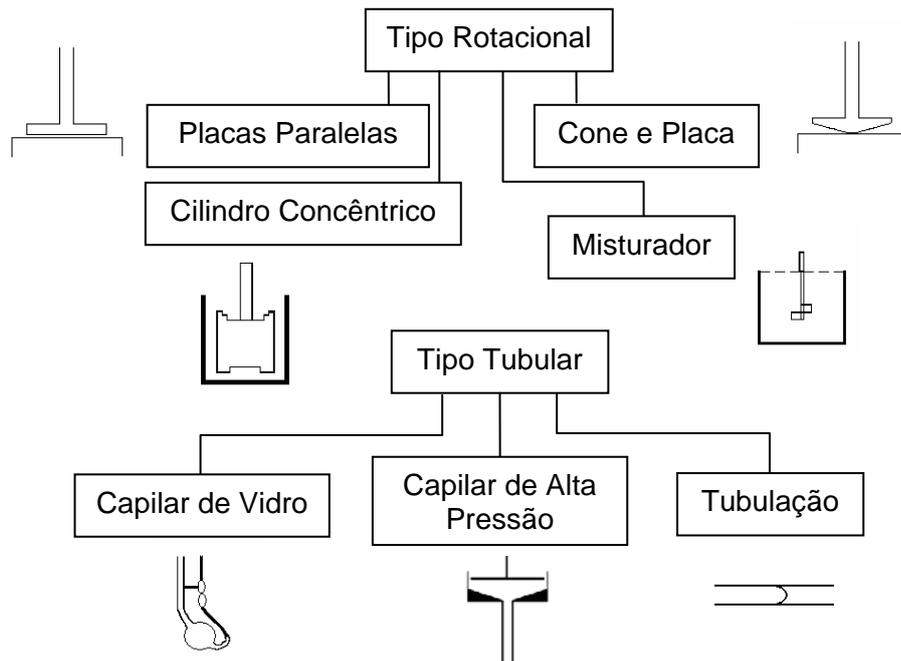
### 3.3 Equipamentos para medição dos parâmetros reológicos

Os instrumentos para medição da reologia dos alimentos podem ser classificados em três categorias: instrumentos de medição das propriedades fundamentais, medição empírica e medição imitativa. Todos os três tipos são utilizados na indústria de alimentos, porém, com o avanço das tecnologias utilizadas na indústria de alimentos, os equipamentos de medição dos parâmetros

fundamentais da reologia dos alimentos vêm sendo cada vez mais utilizados (BORWANKAR, 1992).

Exemplos de instrumentos de medição empíricos são (STEFFE, 1996): Farinógrafo, Viscoamilógrafo, Extensógrafo, Consistômetro Bostwick, entre outros, onde os parâmetros medidos não são claramente definidos, mas a experiência e medições anteriores mostram que os resultados obtidos são úteis. Este tipo de instrumento é amplamente utilizado na indústria de alimentos, principalmente em controle de qualidade (RAO, 1994), devido à sua simplicidade de medição. Já os instrumentos de medição imitativos são menos comuns, porém, a grande vantagem deste tipo de instrumento é que a técnica de medição utilizada pode ser correlacionada com uma situação real, muitas vezes de modelamento complexo envolvendo somente as propriedades fundamentais. O instrumento mais famoso que utiliza a medição imitativa é o instrumento de medição da textura, desenvolvido pela General Foods, em que o teste imita as primeiras duas mordidas no processo de mastigação (BORWANKAR, 1992).

A terceira categoria é a categoria de instrumentos capazes de medir os parâmetros reológicos fundamentais de alimentos fluidos e semi-sólidos. Esta categoria pode ser dividida em duas categorias gerais, como mostra a figura 3.4: do tipo rotacional e do tipo tubular.



**Figura 3.4: Tipos de Reômetros**

Muitos destes instrumentos estão disponíveis comercialmente e outros são facilmente fabricados. Os custos variam desde os mais baratos, como os viscosímetros capilares de vidro, até os mais caros instrumentos rotacionais, capazes de medir as propriedades dinâmicas e as diferenças entre as tensões normais (STEFFE, 1996). Os instrumentos utilizados para medir os parâmetros reológicos são denominados reômetros. Viscosímetro é um termo limitado a instrumentos que medem somente a viscosidade.

Instrumentos rotacionais devem ser operados numa taxa de deformação fixa (Velocidade angular constante) ou oscilatória (Dinâmico). Alguns instrumentos rotacionais trabalham com tensão controlada, facilitando a coleta de dados, a análise dos materiais com baixas taxas de deformação e a avaliação da tensão inicial de escoamento. Essas informações são necessárias para se entender a estrutura interna dos materiais (STEFFE, 1996). A obtenção dos parâmetros reológicos mantendo-se a taxa de deformação constante é a maneira mais utilizada

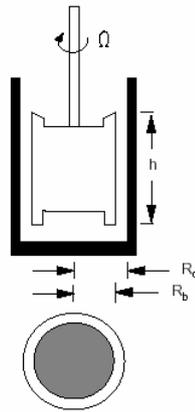
para o cálculo na engenharia de processos. Sistemas rotacionais são geralmente utilizados para investigar o comportamento dependente do tempo, uma vez que os sistemas de tubo permitem apenas uma passagem do material através do instrumento.

Existem vantagens e desvantagens associadas a cada instrumento de medida. O reômetro do tipo tubo capilar de vidro que opera com gravidade, mostrado na fig. 3.4, normalmente é utilizado somente para fluidos Newtonianos, devido à variação da taxa de deformação durante a descarga do tubo (RAO *et al*, 1986). A vantagem do reômetro de tubo capilar é poder trabalhar com altas taxas de deformação e altas tensões de cisalhamento. Já os reômetros cone e placa são limitados para moderadas taxas de deformação, porém, os cálculos (para cone de pequenos ângulos) são simples. Reômetros de tubo e de turbina são melhores para trabalhar com maiores partículas em suspensão quando comparados com reômetros cone e placa ou de placas paralelas. Reômetros de tubos capilares que operam com alta pressão, operam com altas taxas de deformação, porém, freqüentemente é necessário efetuar uma correção de pressão durante a operação do equipamento. Já problemas associados ao escorregamento e com materiais sensíveis à degradação estrutural podem ser minimizados utilizando-se reômetros de turbina. Os reômetros de tubo podem ser construídos para serem utilizados em condições semelhantes à produção ou para operação em planta piloto.

### 3.3.1 Reômetro de Cilindros Concêntricos

O reômetro de cilindros concêntricos é um instrumento muito disponível comercialmente e amplamente utilizado no estudo dos alimentos, como também na indústria de alimentos. Este instrumento se caracteriza por conter a amostra em um cilindro copo e um segundo cilindro imerso no primeiro, de diâmetro

menor e coaxial, como mostra a figura 3.5. Um dos dois cilindros é rotacionado com velocidade constante e o torque transmitido para o outro cilindro é medido. Ele é classificado como do tipo Couette quando o cilindro externo sofre rotação e o cilindro interno permanece em repouso, e do tipo Searle, quando o cilindro interno sofre rotação e o cilindro externo permanece em repouso.



**Figura 3.5: Reômetro de cilindros concêntricos**

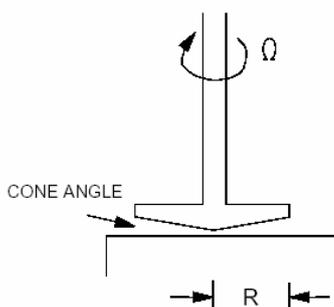
O Reômetro de cilindros concêntricos é muito utilizado para a medição de solução de polímeros, suspensões concentradas de partículas coloidais e géis (DONTULA *et al*, 2005). No exemplo mais simples (Fluido Newtoniano), o líquido entre os dois cilindros sofre uma taxa de deformação constante. O cilindro interno se movimenta a uma velocidade constante ( $\Omega$ ) ou torque constante ( $M$ ). Para chegar ao valor da viscosidade ( $\eta$ ) e dos parâmetros reológicos do fluido, são medidos o torque no cilindro estacionário ou a velocidade angular do cilindro em movimento. A razão entre o torque e a velocidade angular é a viscosidade do fluido. Ibarz (1996) utilizou este modelo de reômetro para estudar os parâmetros reológicos da ameixa selvagem (*Sloe Fruit*), ajustando suas medições aos modelos de Bingham, Lei da Potência e Herschel-Bulckley, obtendo bons resultados em seu trabalho. Haminiuk *et al* (2005) também utilizaram um reômetro de cilindros

concêntricos para o estudo dos parâmetros reológicos da fruta do Araçá. Guerrero & Alzamora (1998) estudaram o efeito do pH, da temperatura e da concentração de açúcar em pêssegos, mamão e manga, alertando para a verificação de algum escorregamento do fluido nas paredes do reômetro, o que pode contribuir para o cálculo impreciso dos parâmetros reológicos.

Segundo Joye (2003) e Steffe (1996), são necessárias correções nos valores da velocidade e torque devido ao escorregamento e às bordas (*end effects*) do cilindro interno. Diversos métodos de correções estão descritos na literatura e também nos manuais dos reômetros, porém, se durante as medições o problema persistir, uma solução é utilizar o reômetro do tipo Mixer ou de cone e placa, por não necessitarem de correções devido a suas características construtivas e de funcionamento.

### 3.3.2 Reômetro Cone e Placa

Como o nome indica, o reômetro do tipo cone e placa consiste em uma placa circular e um cone que quase toca a superfície da placa, e a amostra preenche o espaço entre o cone e a placa (RAO, 1994), como mostra a figura 3.6. O cone é rotacionado com uma velocidade angular conhecida ( $\Omega$ ) que resulta em um torque ( $M$ ) que é medido na placa ou através do cone. Segundo Steefe (1996), alguns instrumentos podem ser projetados de modo que o cone seja fixo e a placa se movimenta.



**Figura 3.6: Reômetro cone e placa**

Este reômetro trabalha com taxas de deformação moderadas, portanto, é inapropriado para fluidos com grandes partículas em suspensão, porque o ângulo do cone é muito pequeno (menor que 5°) e, portanto, não há espaço suficiente entre as partículas, o que pode influenciar na deformação ou comportamento do fluido (TABILO-MUNIZAGA & BARBOSA-CÁNOVAS, 2005).

Apesar de ser inapropriado para fluidos com partículas em suspensão, devido ao pequeno ângulo do cone, esta se caracteriza por ser uma das vantagens do reômetro cone e placa, pois o valor de taxa de deformação é constante ao longo do cone, o que facilita os cálculos utilizando este reômetro. Além disto, os efeitos de bordas são desprezíveis e as medições feitas com altas taxas de deformação são realizadas sem compensar o efeito de variação de temperatura do fluido, desde que este esteja em contato com a placa do reômetro a uma temperatura controlada (TABILO-MUNIZAGA & BARBOSA-CÁNOVAS, 2005).

Da mesma forma como ocorre com o reômetro de cilindros concêntricos, diversos autores utilizam o reômetro cone e placa para o desenvolvimento de seus trabalhos.

Granger *et al* (2003) utilizaram o reômetro do tipo cone e placa para estudar o efeito da concentração de gordura vegetal e seus diferentes tipos na viscosidade de emulsões contendo proteínas do leite. Penna *et al* (2004) utilizaram este equipamento para o estudo do comportamento reológico de bebidas lácteas e sua influência nas características sensoriais do produto.

Kristensen *et al* (1997) estudaram os efeitos da temperatura no comportamento reológico de diversos derivados do leite, sendo um deles o creme de leite a 38% de gordura, utilizando o reômetro de cone e placa, obtendo bons resultados quando comparados com trabalhos de outros autores.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

#### 4.1.1 Leite Condensado

O leite condensado utilizado neste trabalho foi doado pela NESTLÉ BRASIL Ltda. instalada na cidade de Montes Claros – MG. O leite condensado produzido provém da adição de leite, açúcar e lactose, processo já descrito na seção 3.1.2.1. Foram utilizadas amostras com 10 dias de fabricação, armazenadas nas instalações do DETA/UNESP e DEA/FZEA/USP, à temperatura de 25°C. A composição do leite condensado foi determinada no laboratório da universidade, de acordo com a tabela abaixo:

**Tabela 4.1: Composição matéria prima – Leite Condensado**

	Leite Condensado (por 100g)
Açúcar	44,70 ( $\pm$ 0,01)
SNF	19,65 ( $\pm$ 0,01)
Gordura	8,35 ( $\pm$ 0,01)
Água	27,30 ( $\pm$ 0,01)

Para garantir uma matéria-prima com características constantes ao longo do trabalho, foram utilizados produtos com o mesmo tempo de fabricação, já que há variação nas características reológicas do leite condensado ao longo do tempo. Segundo Varnam (1994), esta é uma característica comum resultante do processo de concentração do leite onde as moléculas de caseína presentes no leite se agregam formando uma rede tridimensional e, conseqüentemente, o aumento da viscosidade do leite condensado.

#### 4.1.2 Creme de Leite

Para a preparação das amostras de creme de leite, foi utilizada nata com aproximadamente 39,8% de gordura, fornecida pelo DEA/FZEA/USP. A composição da nata e do leite desnatado foi determinada no laboratório da universidade, de acordo com a tabela abaixo:

**Tabela 4.2: Composição matéria prima – Creme de leite**

	Nata (por 100g)	Leite Desnatado (por 100g)
Proteínas	2,1 ( $\pm 0,02$ )	3,6 ( $\pm 0,04$ )
Carboidratos	2,8 ( $\pm 0,02$ )	4,6 ( $\pm 0,04$ )
Gordura	39,8 ( $\pm 0,04$ )	0,5 ( $\pm 0,04$ )
Água	54,2 ( $\pm 0,04$ )	91,2 ( $\pm 0,04$ )

#### 4.2 Métodos

##### 4.2.1 Preparação das amostras

###### 4.2.1.1 Leite Condensado

Para a preparação da amostra de leite condensado (0,5 ml por amostra) foi utilizada uma lata de produto estocada no laboratório, aberta exclusivamente para a realização dos experimentos.

###### 4.2.1.2 Creme de Leite

Para a preparação das amostras de creme de leite foi utilizada nata com aproximadamente 40% de gordura em sua composição. Para a preparação das amostras com teor de gordura menor que 40% utilizou-se leite desnatado (3% de gordura) para diluição da amostra. Foi realizado um balanço de massa para a diluição de leite desnatado para amostras com diferentes teores de gordura.

## 4.2.2 Obtenção dos parâmetros reológicos

### 4.2.2.1 Leite Condensado

Os parâmetros reológicos do leite condensado foram determinados utilizando-se um reômetro rotacional do tipo cone e placa de tensão controlada, marca TA modelo AR 2000 com sistema de aquisição de dados AR V.5.3.0, localizado no laboratório do DEA/FZEA/USP. O reômetro é equipado com uma camisa externa que aquece ou resfria a placa inferior do reômetro, onde a temperatura da amostra mantém-se constante durante cada experimento.

A quantidade de amostra para o ensaio varia de acordo com o tamanho do cone e placa a ser utilizado. Para o ensaio realizado, o volume de amostra utilizado foi de 0,5 ml para a placa de 40 mm de diâmetro e de 4 ml para o cone-placa de 60 mm de diâmetro e inclinação de 4°.

O intervalo de temperatura analisado no estudo foi de 278 K a 343 K, que é o intervalo de temperatura ao qual o leite condensado é submetido ao longo do processo de fabricação, na faixa de taxa de deformação entre 0,1 a 100 s<sup>-1</sup>. Todas as medições foram determinadas em duplicata.

### 4.2.2.2 Creme de leite

Para a determinação dos parâmetros reológicos do creme de leite, foi utilizado o mesmo equipamento no qual foram realizadas as medições do leite condensado, ou seja, um reômetro rotacional do tipo cone e placa de tensão controlada, marca TA modelo AR 2000 com sistema de aquisição de dados AR V.5.3.0, localizado no laboratório DEA/FZEA/USP.

A quantidade de amostra para o ensaio foi de 4 ml para o cone-placa de 60 mm de diâmetro e inclinação de 4°.

O intervalo de temperatura analisado no estudo foi de 275,4 K a 359,8 K, que é o intervalo de temperatura ao qual o leite condensado é submetido ao longo do processo de fabricação, nas concentrações de gordura de 10,2% a 30,6%, na faixa de taxa de deformação entre 25 a 300 s<sup>-1</sup>. Todas as medições foram realizadas em duplicata.

Para determinação dos parâmetros reológicos tanto para o leite condensado como para o creme de leite foi utilizado o software “Microcal Origin”, que através da regressão não-linear determina os valores dos parâmetros reológicos, o ajuste dos dados experimentais ao modelo determinado, como também os parâmetros estatísticos de desvio padrão e coeficiente de determinação. Para o estudo da influência combinada da temperatura e teor de gordura do creme de leite foi utilizado o software STATISTICA (StatSoft, Inc., 1995).

#### 4.2.3 Operação do reômetro

##### 4.2.3.1 Leite Condensado

A amostra de leite condensado contendo 0,5 ml foi colocada vagarosamente no cilindro inferior do reômetro. Após a colocação da amostra, a placa utilizada para medição desceu lentamente, entrando em contato com a amostra em questão. O sistema ficou em repouso até a temperatura do corpo do reômetro atingir a temperatura de medição e após isto o sistema ficou em equilíbrio por 2 minutos para a amostra atingir a temperatura de medição. Após o equilíbrio, as medições foram iniciadas, variando-se a velocidade de rotação de forma crescente, e, em seguida, de forma decrescente. O reômetro foi operado no regime contínuo de forma que cada medição era realizada a cada 3 segundos, totalizando 31 pontos de medição em cada regime (ascendente e descendente).

#### 4.2.3.2 Creme de leite

A amostra de creme de leite contendo 4 ml foi colocada vagarosamente no cilindro inferior do reômetro. Após a colocação da amostra, a placa utilizada para medição desceu lentamente, entrando em contato com a amostra em questão. O sistema ficou em repouso até a temperatura do corpo do reômetro atingir a temperatura de medição e após isto o sistema ficou em equilíbrio por 2 minutos para a amostra atingir a temperatura de medição. Após o equilíbrio, as medições foram iniciadas, variando-se a velocidade de rotação de forma crescente, e, em seguida, de forma decrescente. O reômetro foi operado no regime de estado estacionário de forma que cada medição era realizada a cada 20 segundos (média de 20 pontos coletado neste intervalo), totalizando 12 pontos de medição em cada regime (ascendente e descendente).

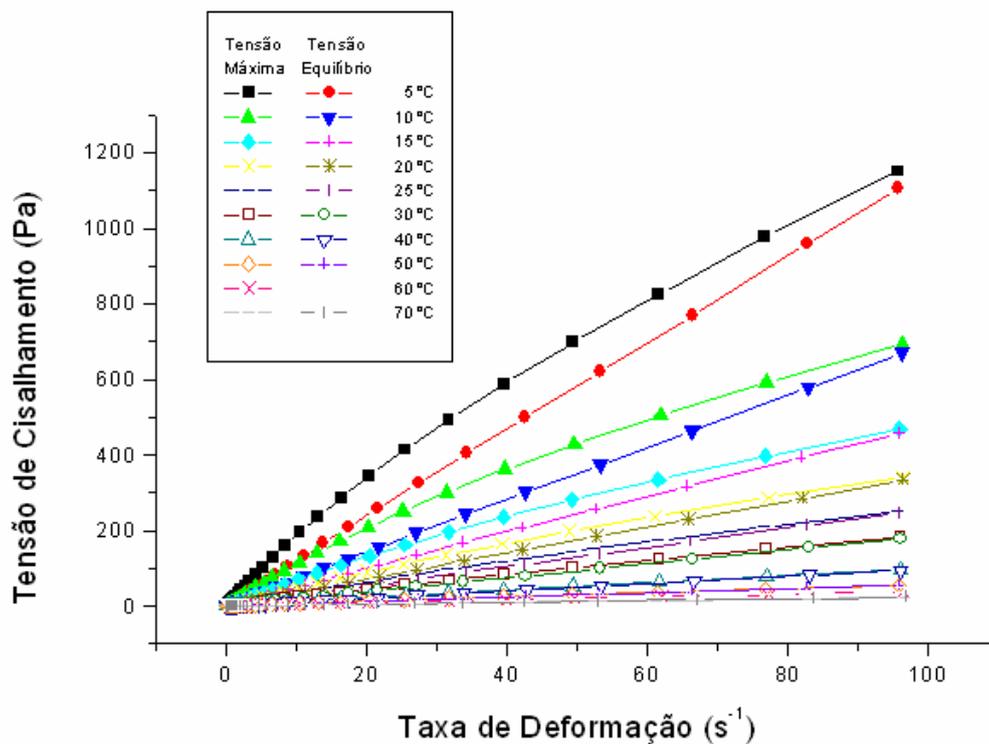
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Leite Condensado

Neste trabalho foram obtidos reogramas para leite condensado com temperaturas entre 278 e 343 K, como mostra a tabela 5.1 e a figura 5.1 abaixo:

**Tabela 5.1: Faixa de medição dos parâmetros reológicos do Leite Condensado**

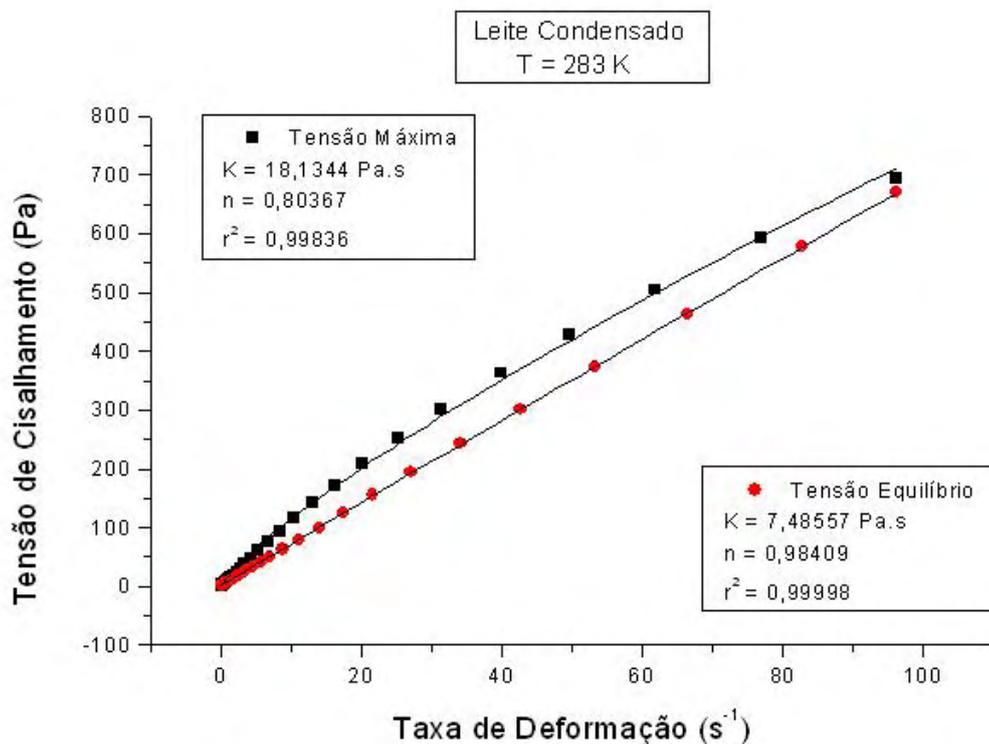
% de sólidos (% p/p)	Temperatura (K)									
	278	283	288	293	298	303	313	323	333	343
	Taxa de deformação, (s <sup>-1</sup> )									
72,70	0,1 – 100									



**Figura 5.1: Reogramas do Leite Condensado na tensão de cisalhamento máxima e na tensão de cisalhamento de equilíbrio**

As amostras apresentaram comportamento não-Newtoniano, pseudoplástico com dependência da temperatura nos parâmetros reológicos. Foram

utilizados os modelos de Otswald-De Waele e Herschel-Bulkley para análise dos dados experimentais, tanto pela simplicidade de cálculo e compreensão dos dados obtidos, bem como pela utilização destes modelos nas aplicações de Hidrodinâmica e Transferência de Calor. Para o ajuste dos dados experimentais aos modelos reológicos foram utilizados os pontos das curvas ascendente (tensão de cisalhamento máxima) e descendente (tensão de cisalhamento de equilíbrio), pois se observou a presença de tixotropia nas amostras de leite condensado, como mostra a figura 5.2:



**Figura 5.2: Reograma do Leite Condensado com Temperatura de T= 283 K – Tensão de cisalhamento máxima e tensão de cisalhamento de equilíbrio**

Como pode ser observado pela figura acima, durante a realização das medições foi verificada uma diferença entre as leituras realizadas com velocidades crescente e decrescente de rotação, caracterizando a presença de

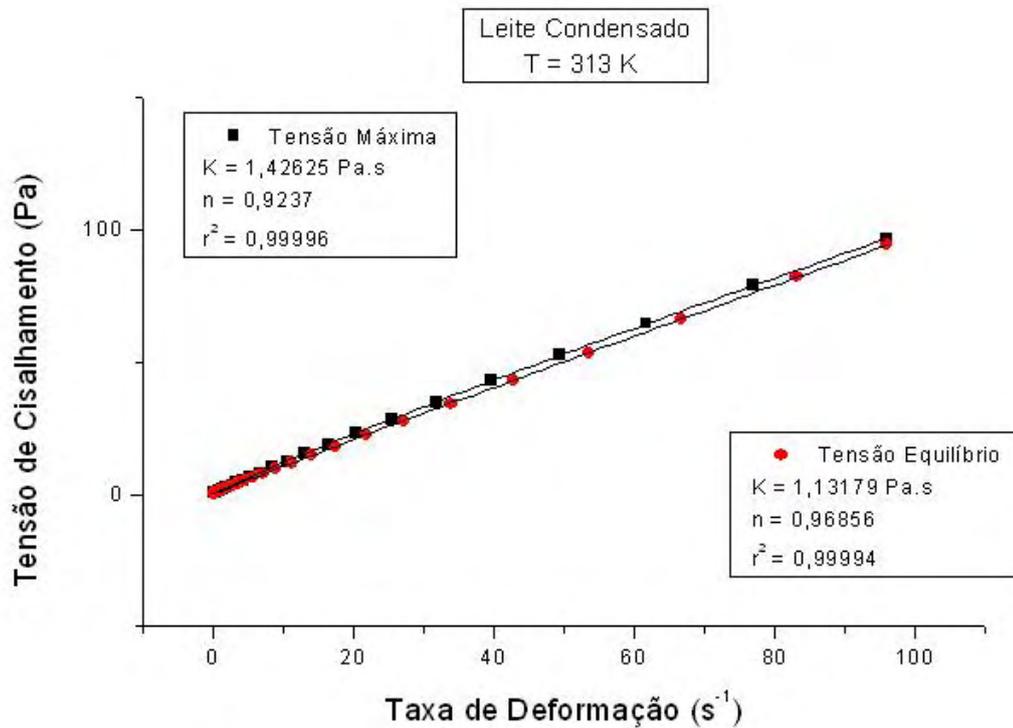
tixotropia, havendo necessidade da realização de medições em todas as temperaturas nos dois sentidos de rotação.

Da mesma forma que em trabalhos anteriores (TELIS-ROMERO *et al*, 1999; CABRAL, 2000; THOMAZ, 2002), foram desprezadas as altas e baixas taxas de deformação ( $< 0,1 \text{ s}^{-1}$ ), de forma a não violar as hipóteses de Krieger e Elrod (1953) e Yang e Krieger (1978) utilizadas para obter a taxa de deformação, totalizando um número de 31 dados para cada um dos experimentos realizados. Portanto, para a obtenção dos parâmetros reológicos do leite condensado, utilizou-se a faixa de taxa de deformação entre  $0,1 \text{ s}^{-1}$  e  $100 \text{ s}^{-1}$ , utilizadas em todas as faixas de temperatura citadas anteriormente.

#### 5.1.1 Modelo de Otswald-De-Waele

Os reogramas de leite condensado em todas as faixas de temperatura deste estudo, ou seja, entre 278 K e 343 K, apresentaram comportamento pseudoplástico que foram ajustados ao modelo de Otswald-De-Waele (Lei da Potência). Thomáz (2002), Telis-Romero *et al* (1998) e Barbosa-Cánovas & Vélez-Ruiz (1997) obtiveram os mesmos resultados para ovo líquido, suco de laranja e leite concentrado, respectivamente, relacionando o comportamento pseudoplástico com a alta concentração de sólidos (72,70%).

A figura 5.3 abaixo mostra o ajuste do leite condensado na temperatura de 313 K ao modelo de Otswald-De-Waele. Os dados experimentais se ajustaram bem ao modelo com coeficiente de determinação de 0,999.



**Figura 5.3: Reograma do Leite Condensado com Temperatura de T= 313 K – Tensão máxima e tensão de equilíbrio**

O ajuste ao modelo de Otswald-De-Waele (Lei da potência) permitiu o cálculo dos parâmetros reológicos do fluido, índice de consistência (K) e índice de comportamento do fluido (n), que foram determinados utilizando-se o modelo nas diferentes temperaturas. Haminuk *et al* (2005), utilizaram este modelo para determinação dos parâmetros reológicos da polpa do Araçá e Arslan *et al* (2004) para determinação dos parâmetros reológicos da mistura pasta de gergelim e suco concentrado de uva, que possui uma alta concentração de açúcar em sua composição (68%), ambos obtendo bons coeficientes de determinação no ajuste dos dados experimentais.

As tabelas 5.2 e 5.3 abaixo mostram os valores dos parâmetros reológicos nas tensões de cisalhamento máxima e tensão de cisalhamento de equilíbrio:

**Tabela 5.2: Parâmetros reológicos de Leite Condensado – Tensão de cisalhamento Máxima**

	Temperatura (K)									
	278	283	288	293	298	303	313	323	333	343
Índice de Consistência (Pa.s <sup>n</sup> )	29,814	18,134	10,467	6,609	4,438	2,929	1,426	0,822	0,560	0,377
Índice de comportamento do fluido (-)	0,80	0,80	0,84	0,87	0,89	0,91	0,92	0,92	0,92	0,91

\* Válido para taxas de deformação entre 0,1 e 100 s<sup>-1</sup>

**Tabela 5.3: Parâmetros reológicos de Leite Condensado – Tensão de cisalhamento de Equilíbrio**

	Temperatura (K)									
	278	283	288	293	298	303	313	323	333	343
Índice de Consistência (Pa.s <sup>n</sup> )	12,572	7,486	5,474	3,755	2,759	2,001	1,132	0,698	0,470	0,333
Índice de comportamento do fluido (-)	0,98	0,98	0,97	0,98	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93

\* Válido para taxas de deformação entre 0,1 e 100 s<sup>-1</sup>

Como se pode observar pela análise das tabelas acima, os valores do índice de consistência (K) diminuem com o aumento da temperatura tanto no regime ascendente (tensão de cisalhamento máxima) como no regime descendente (tensão de cisalhamento de equilíbrio). Já os valores do índice de comportamento do fluido (n) aumentam com o aumento da temperatura para as curvas no regime ascendente e diminuem com o aumento da temperatura para as curvas no regime descendente. Ainda pode ser observado que o índice de comportamento do fluido variou entre 0,80 e 0,98, valores menores que a unidade, indicando a natureza pseudoplástica do leite condensado, sendo a característica de fluido pseudoplástico

mais clara no regime ascendente. Para todos os ajustes os coeficientes de determinação estão acima de 0,999. Este comportamento pseudoplástico observado pode ser explicado como consequência do aumento da taxa de deformação e o alinhamento das moléculas presentes, o que causa uma diminuição na resistência à fricção (VÉLEZ-RUIZ & BARBOSA-CÁNOVAS 1997).

Ainda através das análises dos reogramas do leite condensado, mostrados nas figuras 5.4 e 5.5, e os valores calculados dos parâmetros reológicos, é possível afirmar que o comportamento pseudoplástico é mais acentuado nas curvas ascendentes se comparado com as curvas descendentes, pois para os reogramas que representam os valores de tensão de cisalhamento de equilíbrio as curvas aproximam-se de retas e os valores do índice de comportamento do fluido se aproximam da unidade, caracterizando o comportamento newtoniano do leite condensado nestas condições.

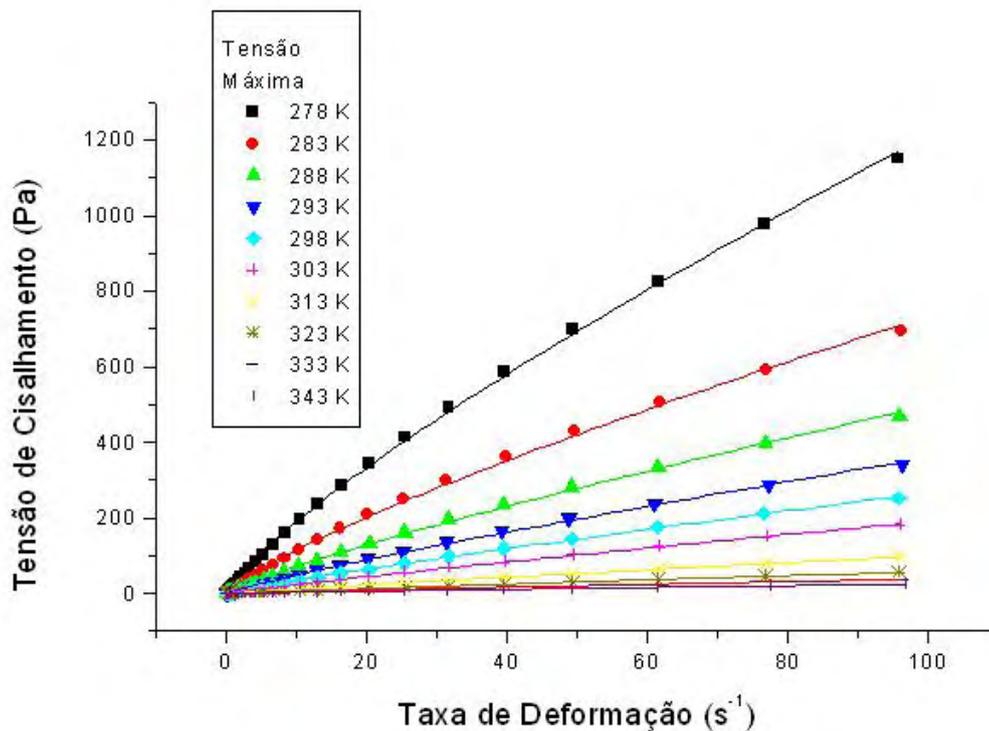
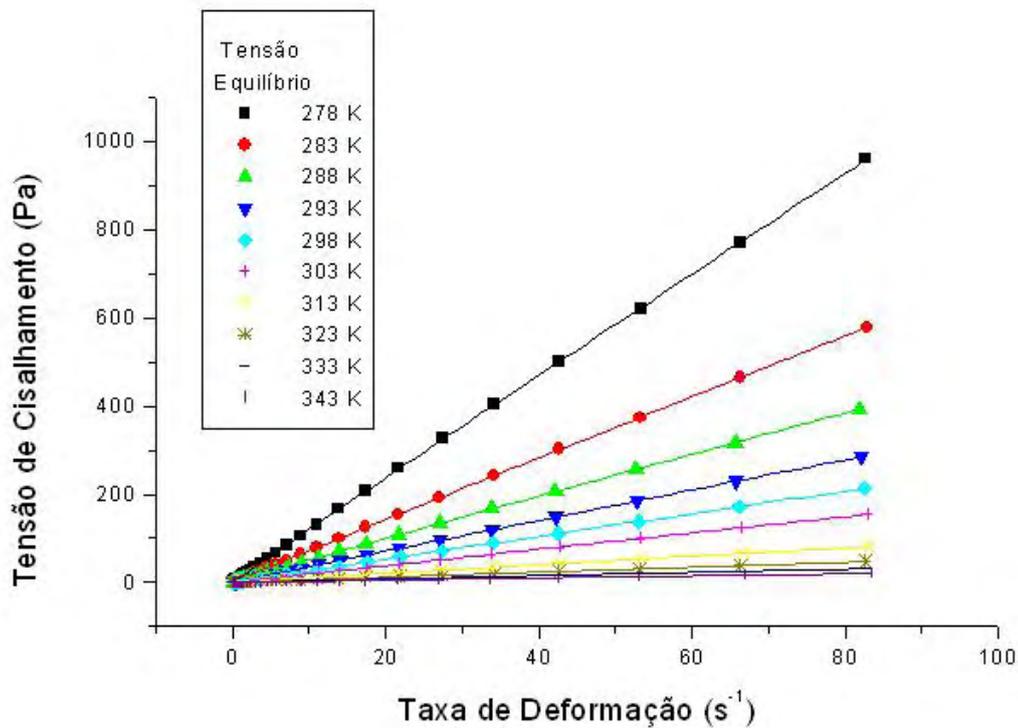


Figura 5.4: Reogramas do Leite Condensado na tensão de cisalhamento máxima



**Figura 5.5: Reogramas do Leite Condensado na tensão de cisalhamento de equilíbrio**

### 5.1.2 Influência da Temperatura nos parâmetros reológicos

Com o objetivo de estudar a influência da temperatura nos parâmetros reológicos do leite condensado, foram testadas duas funções clássicas (Potencial e Exponencial), amplamente utilizadas na engenharia e citadas por diversos autores como Rao (1999), Steefe (1996), Telis-Romero *et al* (1999), entre outros. Os dados experimentais melhor se ajustaram à Equação 3.7 (análoga à Equação de Arrhenius) e, como era esperado, o índice de consistência (K) diminuiu com o aumento da temperatura. Vélez-Ruiz & Barbosa-Cánovas (1997), Chang & Hartel (1997) e Giner *et al* (1996) utilizaram esta mesma correlação para estudar a influência da temperatura nos parâmetros reológicos de leite concentrado, leite desnatado concentrado e suco de cereja. O ajuste dos dados experimentais ao modelo pode ser verificado através das figuras 5.6 e 5.7:

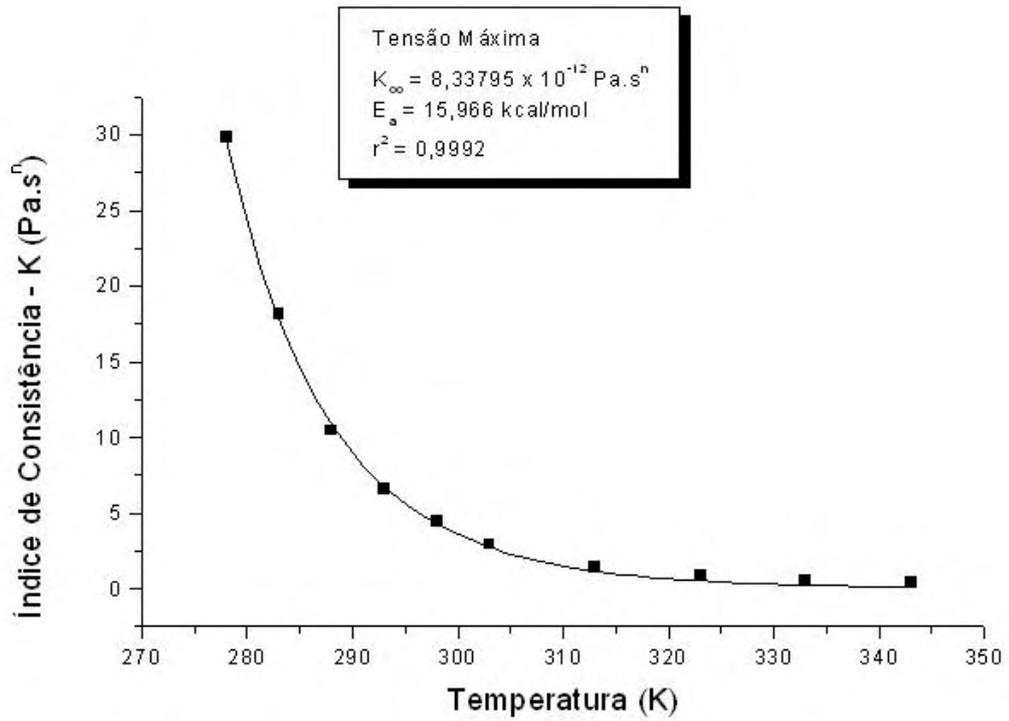


Figura 5.6: Efeito da temperatura no índice de consistência do leite condensado – Tensão de Cisalhamento Máxima

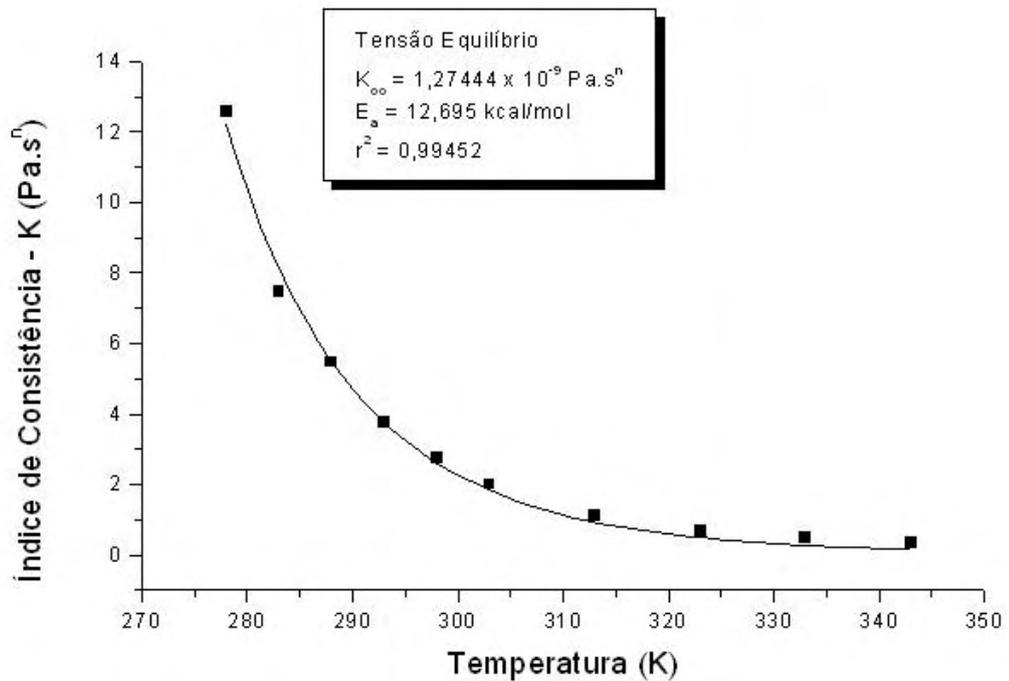


Figura 5.7: Efeito da temperatura no índice de consistência do leite condensado – Tensão de Cisalhamento de Equilíbrio

Como pode ser observado através das figuras acima, o índice de consistência diminuiu com o aumento da temperatura, tanto no regime ascendente como no regime descendente. Através do ajuste dos dados experimentais ao modelo de Arrhenius, foram determinados os valores de energia de ativação ( $E_a$ ) e o fator ( $K_\infty$ ) para a tensão de cisalhamento máxima e tensão de equilíbrio. Os valores de energia de ativação variaram entre 15,966 e 12,695 kcal/mol e  $8,338 \times 10^{-12}$  e  $1,274 \times 10^{-9}$ , respectivamente, como mostram as tabelas 5.4 e 5.5. Este resultado é semelhante ao observado por Chang & Hartel (1997) e Giner *et al* (1996) para leite desnatado concentrado e suco de cereja com a mesma concentração do leite condensado (74%), respectivamente, com valores da mesma ordem de grandeza dos obtidos nestes trabalhos.

Como mostram as tabelas 5.4 e 5.5 abaixo, ambos os parâmetros se ajustaram bem à correlação utilizada com valores de  $r^2$  variando entre 0,999 e 0,994.

**Tabela 5.4: Parâmetros da Equação 3.6 – Tensão de Cisalhamento Máxima**

% de Açúcar (% p/p)	$K_\infty (10^{-12})$ (Pa.s <sup>n</sup> )	$E_a$ (kcal/mol)	$r^2$
73	8,338	15,966	0,999

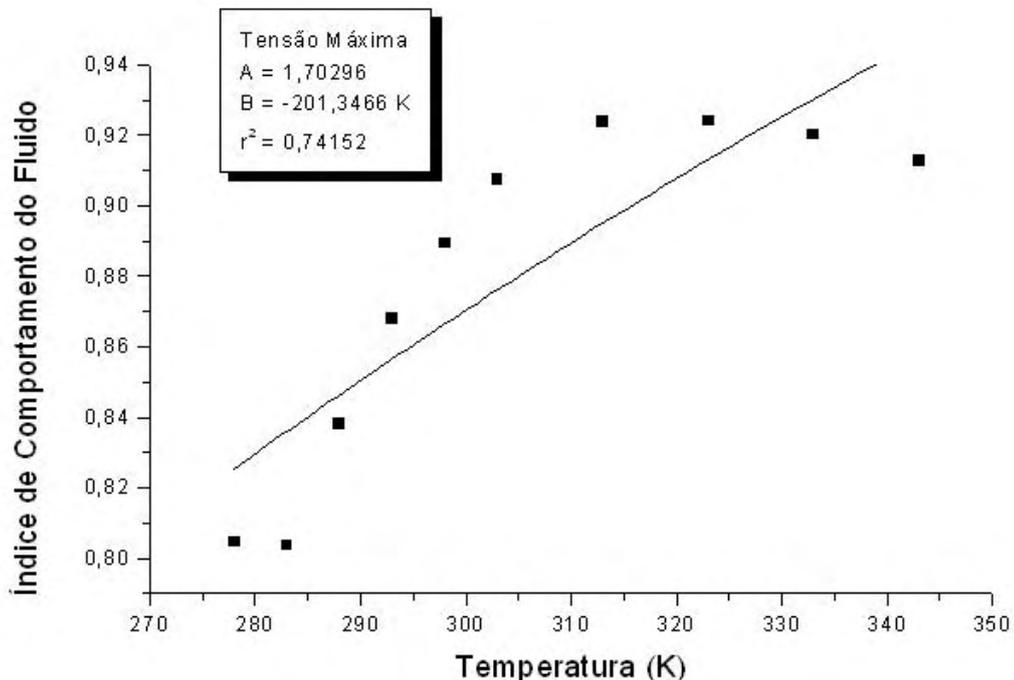
**Tabela 5.5: Parâmetros da Equação 3.6 – Tensão de Cisalhamento de Equilíbrio**

% de Gordura (% p/p)	$K_\infty (10^{-9})$ (Pa.s <sup>n</sup> )	$E_a$ (kcal/mol)	$r^2$
73	1,274	12,695	0,994

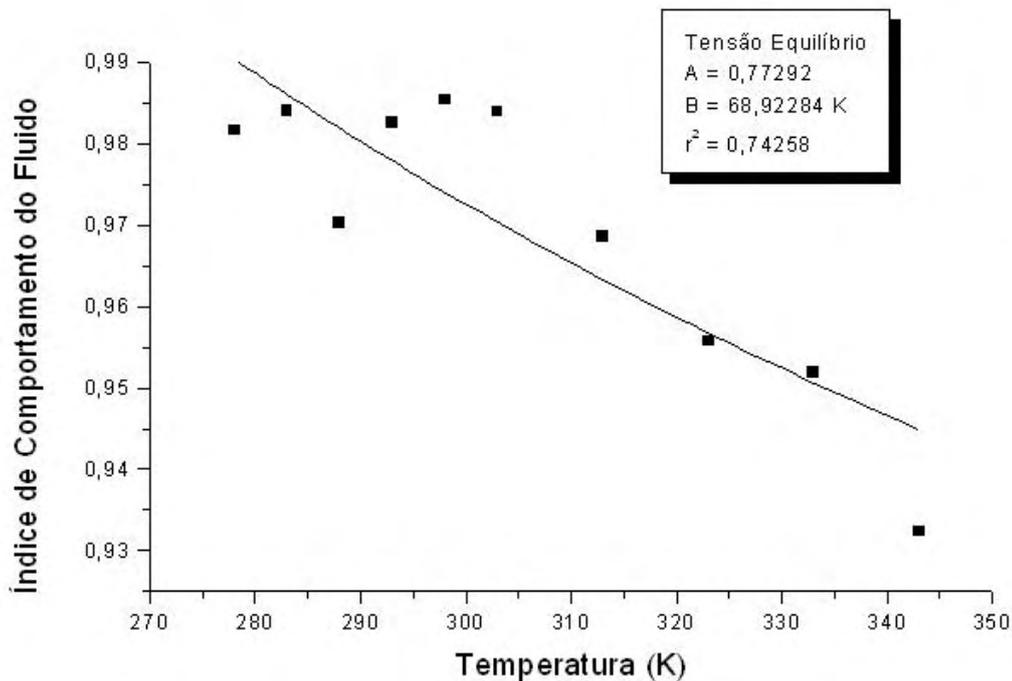
Para determinar a influência da temperatura nos valores do índice de comportamento do fluido foi utilizada a equação 3.7.

Telis-Romero *et al* (2006) utilizaram esta mesma correlação para determinar a influência da temperatura no índice de comportamento do fluido do ovo líquido, que também possui características pseudoplásticas.

Os resultados dos ajustes dos valores do índice de comportamento do fluido para os valores de tensão de cisalhamento máxima e tensão de cisalhamento de equilíbrio são mostrados nas figuras 5.8 e 5.9. Observa-se, através da análise das figuras, um comportamento diferente para os dois regimes, onde o valor do índice de comportamento do fluido aumenta com o aumento da temperatura para valores de tensão de cisalhamento máxima, enquanto os valores do índice de comportamento do fluido diminuem com o aumento da temperatura para valores de tensão de cisalhamento de equilíbrio.



**Figura 5.8: Efeito da temperatura no índice de comportamento do leite condensado – Tensão de Cisalhamento Máxima**



**Figura 5.9: Efeito da temperatura no índice de comportamento do leite condensado – Tensão de Cisalhamento de Equilíbrio**

Os valores dos parâmetros calculados pela equação 3.7 são apresentados nas tabelas 5.6 e 5.7. Os valores dos coeficientes de determinação  $r^2$  estão entre 0,741 e 0,742.

**Tabela 5.6: Parâmetros da Equação 3.7 – Tensão de Cisalhamento Máxima**

% de Açúcar (% p/p)	K (-)	$E_a$ (kcal/mol)	$r^2$
73	1,703	-0.3986	0,741

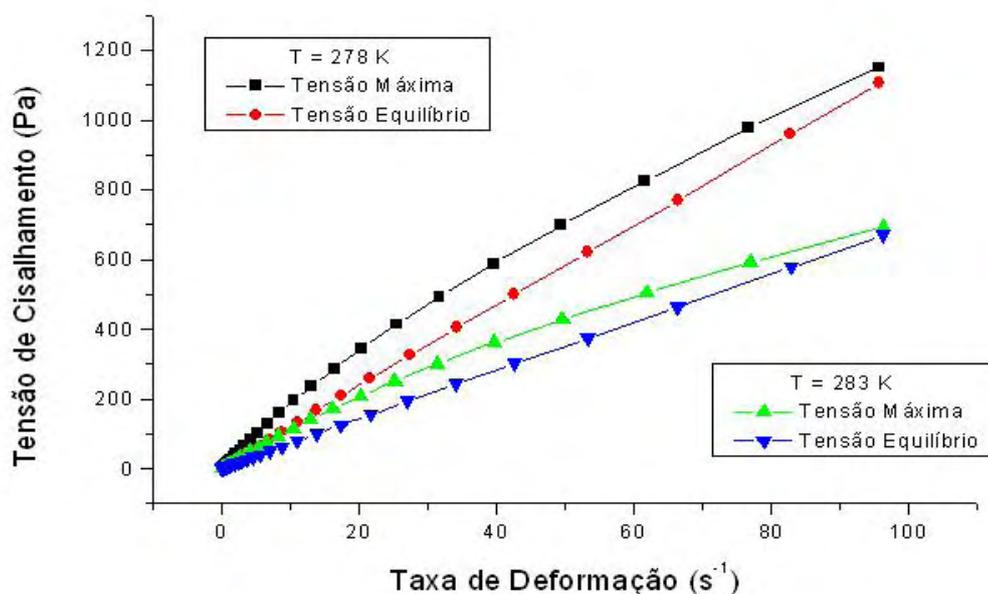
**Tabela 5.7: Parâmetros da Equação 3.7 – Tensão de Cisalhamento de Equilíbrio**

% de Açúcar (% p/p)	K (-)	$E_a$ (kcal/mol)	$r^2$
73	0,773	0,1364	0,742

Pode-se ainda afirmar através da análise das figuras e tabelas acima, que os valores do índice de consistência (K) são mais influenciados pelo aumento da temperatura do que os valores do índice de comportamento do fluido (n). Vélez-Ruiz & Barbosa-Cánovas (1997), entre outros autores, observaram o mesmo comportamento, ou seja, maior influência da temperatura no índice de consistência quando comparado ao índice de comportamento do fluido.

### 5.1.3 Comportamento tixotrópico

Como foi brevemente comentado anteriormente, observou-se a presença de tixotropia através da leitura dos reogramas, ao verificar-se a existência do lóbulo de histerese em toda a faixa de temperatura de estudo, o que indica a dependência do tempo e caracteriza o material como tixotrópico (THOMAZ, 2002). A figura 5.10 indica a presença de tixotropia no leite condensado nas temperaturas de 278 K e 283 K.



**Figura 5.10: Reograma do Leite Condensado com Temperatura de T = 278 K e 283 K – Comportamento Tixotrópico**

Ainda pode ser observado pela análise dos reogramas das figuras 5.1 e 5.10 que, quanto maior é a temperatura, menor é o lóbulo de histerese formado entre as curvas ascendente e descendente, podendo-se afirmar que a tixotropia é influenciada pela temperatura no leite condensado. Adorno (1997) cita em seu trabalho com suco de laranja concentrado em baixas temperaturas, que a presença de tixotropia se dá em razão das mudanças estruturais que ocorrem na substância sob ação do cisalhamento, observadas através da análise dos reogramas e da verificação do lóbulo de histerese.

## 5.2 Creme de Leite

Neste trabalho foram obtidos reogramas para creme de leite com teores de gordura variando entre 10,2% e 30,2%, e temperaturas entre 275,4 e 359,8 K, como mostra a tabela abaixo:

**Tabela 5.8: Faixa de medição dos parâmetros reológicos de Creme de Leite**

% de	Temperatura (K)												
Gordura													
(% p/p)	275,4	279,8	283	291,3	298	306,4	313	321	328,6	333,2	342,6	351,4	359,8
	Taxa de deformação, (s <sup>-1</sup> )												
10,2													
15,1													
20,3	25,12 - 300												
25,1													
30,6													

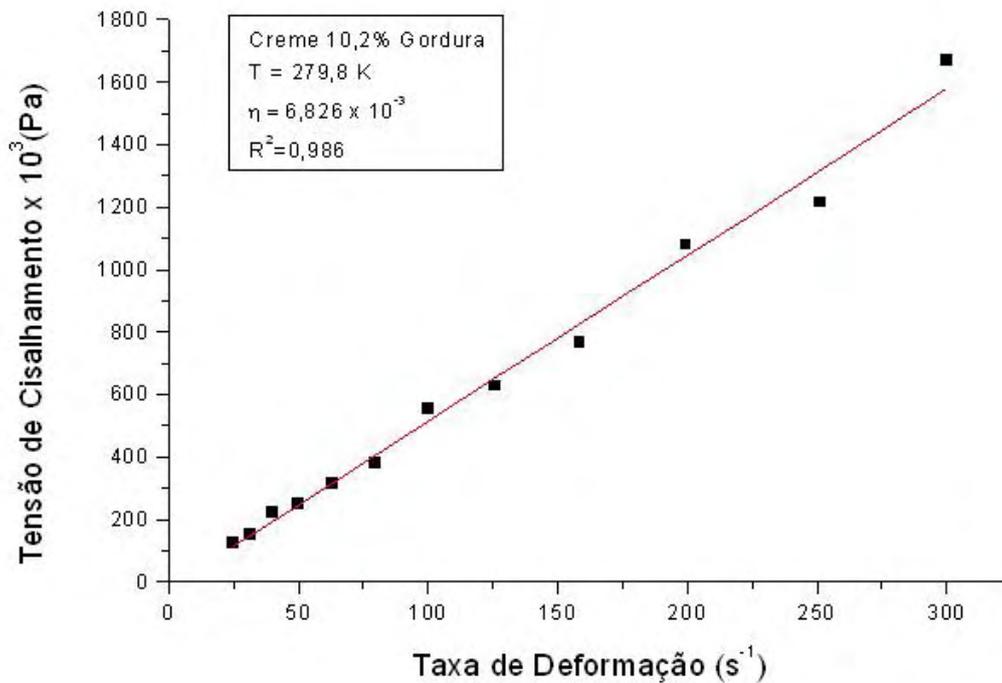
As amostras apresentaram comportamento Newtoniano e Viscoplástico, dependendo da temperatura e teor de gordura. Foram utilizados os modelos de Newton, Otswald-De Waele e Bingham para análise dos dados experimentais.

Da mesma forma que em trabalhos anteriores (TELIS-ROMERO *et al*, 1999; CABRAL, 2000 e THOMAZ, 2002), foram desprezadas as altas e baixas taxas de deformação, de forma a não violar as hipóteses de Krieger e Elrod (1953) e Yang e Krieger (1978) utilizadas para obter a taxa de deformação. Portanto, para a obtenção dos parâmetros reológicos do creme de leite, utilizou-se a faixa de taxa de deformação entre  $25 \text{ s}^{-1}$  e  $300 \text{ s}^{-1}$ , utilizadas em todas as faixas de temperatura e teor de gordura citadas anteriormente.

#### 5.2.1 Modelo de Newton

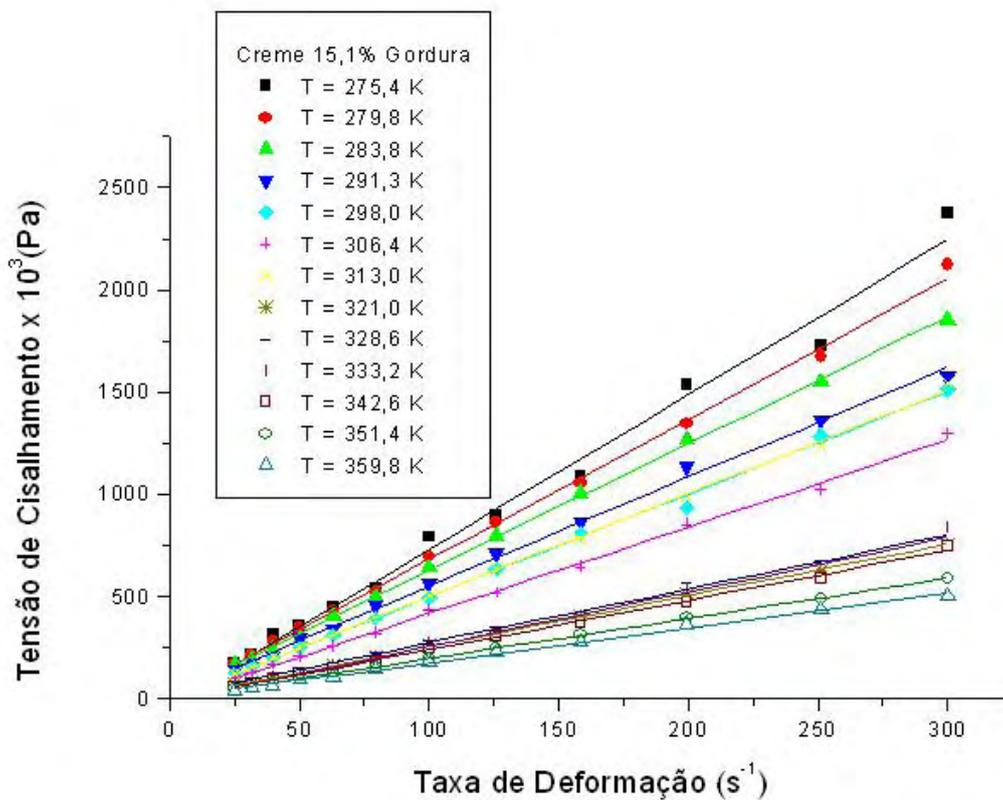
Os reogramas de creme de leite para a faixa de gordura entre 10,2% e 15,1% em todas as faixas de temperatura deste estudo, ou seja, entre 275,4 e 359,8 K, apresentaram comportamento Newtoniano. O mesmo comportamento ocorreu para as amostras com teor de gordura entre 20,3% e 30,6% nas faixas de temperatura entre 313 K e 359,8 K. Cabral (2000), Vélez-Ruiz & Barbosa-Cánovas (1997) e Ibarz (1996) obtiveram os mesmos resultados para extrato de café, leite concentrado e sucos, respectivamente, relacionando o comportamento Newtoniano com a baixa concentração de sólidos (10,2% e 15,1%) e a alta temperatura na segunda faixa de estudo (313 K e 359,8 K).

A figura 5.11 abaixo mostra o ajuste do modelo de Newton para o creme de leite com teor de gordura de 10,2% e temperatura de 279,8 K. Os dados experimentais se ajustaram bem ao modelo com coeficiente de determinação de 0,986.



**Figura 5.11: Reograma do Creme de Leite com Temperatura de T= 279,8K e teor de gordura igual a 10,2%**

Pode ser observado através da figura 5.12 que os dados experimentais se ajustaram bem ao modelo de Newton nas diferentes temperaturas e com o teor de gordura de 10,2%. De acordo com o esperado e também verificado em trabalhos de outros autores como Haminiuk *et al* (2005), Cabral (2000), Vélez-Ruiz & Barbosa-Cánovas (1997) e Ibarz (1996), a viscosidade diminuiu com o aumento da temperatura.



**Figura 5.12: Ajuste para o modelo de Newton para o Creme de Leite em diferentes temperaturas e teor de gordura igual a 10,2%**

Conforme já citado, resultados semelhantes foram observados para a mesma faixa de temperatura e teor de gordura de 15,1%. Para os teores de gordura de 20,3%, 25,1% e 30,2%, o modelo de Newton se ajustou adequadamente apenas para as faixas de temperatura entre 313 K e 359,8 K.

A tabela 5.9 mostra os valores de viscosidade nas diferentes concentrações e temperaturas para o creme de leite. Os coeficientes de determinação variaram entre 0,986 e 0,999.

Como pode ser observado abaixo, houve um decréscimo da viscosidade em função do aumento de temperatura, porém, houve um aumento da viscosidade em função do aumento do teor de gordura do creme de leite.

Kriestensen *et al* (1997) obtiveram resultados similares para creme de leite com teor de gordura abaixo de 40% e temperatura acima de 313 K.

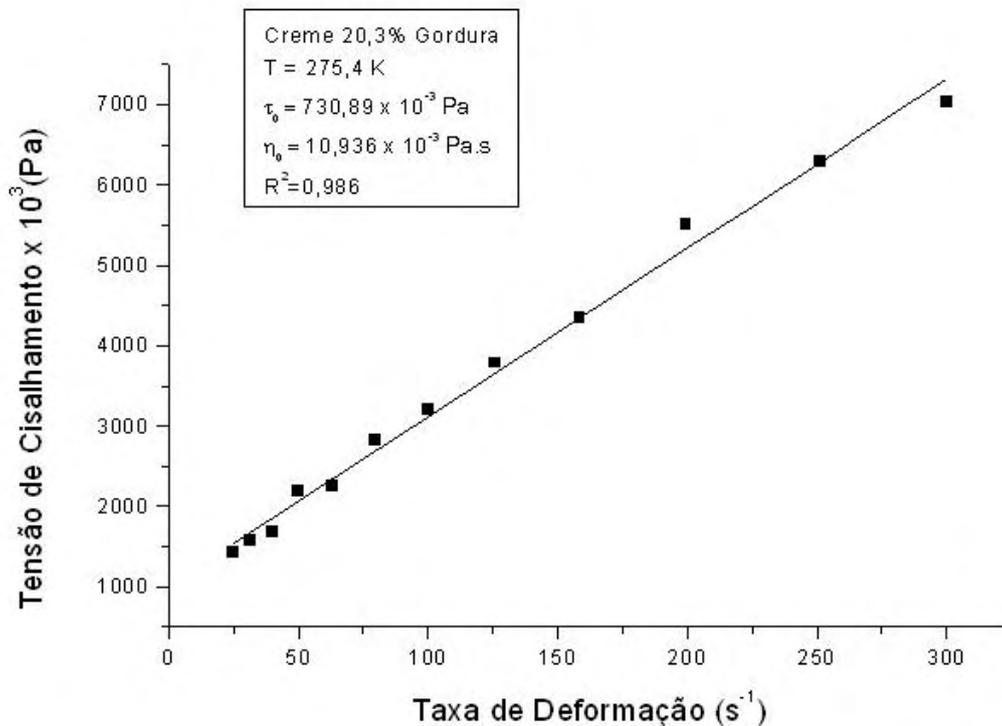
**Tabela 5.9: Viscosidades do creme de leite em diferentes frações de gordura e temperaturas - Domínio Newtoniano**

% de Gordura (% p/p)	Temperatura (K)												
	275,4	279,8	283	291,3	298	306,4	313	321	328,6	333,2	342,6	351,4	359,8
	Viscosidade*, $\eta \times 10^3$ (Pa.s)												
10,2	5,602	5,113	5,006	4,139	3,742	2,602	2,763	2,409	2,166	1,998	1,770	1,607	1,382
15,1	7,275	6,826	6,311	5,523	5,006	4,169	5,013	2,563	2,757	2,556	2,406	1,983	1,777
20,3							4,745	4,408	3,729	3,610	3,150	2,781	2,366
25,1							6,337	5,614	5,129	4,910	4,337	3,759	3,343
30,6							8,879	8,229	7,113	6,700	6,013	5,162	4,527

\* Válido para taxas de deformação entre 25 e 300 s<sup>-1</sup>

### 5.2.2 Modelo de Bingham

O creme de leite exibiu comportamento viscoplástico com o aumento do teor de gordura. Desta forma, para os teores de gordura de 20,3%, 25,1% e 30,2% e nas faixas de temperatura abaixo de 313 K, ou seja, entre 275,4 K e 306,4 K, os reogramas apresentaram comportamento que melhor se ajusta ao modelo de Bingham, sendo desta forma determinado os parâmetros reológicos, como mostra a figura 5.13:

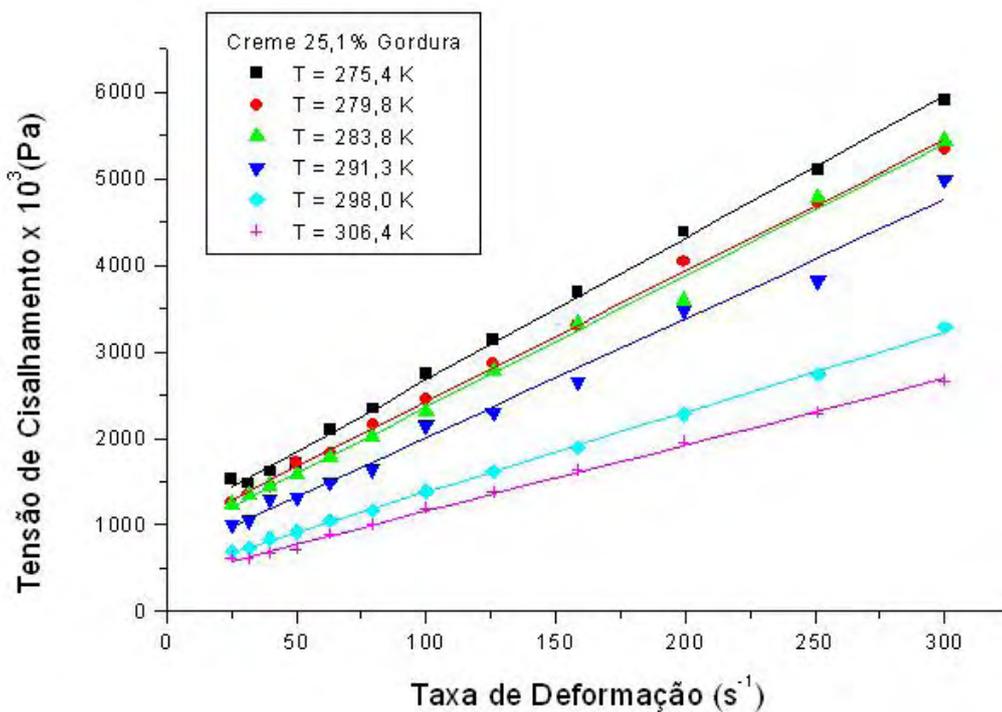


**Figura 5.13: Reograma do Creme de Leite com Temperatura de T= 275,4K e fração de gordura igual a 20,3%**

De acordo com Kriestensen *et al* (1997), que observaram o mesmo comportamento para creme de leite, a presença de tensão de cisalhamento inicial é fortemente influenciada pela temperatura. A tensão de cisalhamento inicial ( $\sigma_0$ ) obtida para o creme de leite com 20,3% de gordura foi de 730,89 mPa e a viscosidade plástica ( $\eta_b$ ) foi de 10,936 mPa.s, valores com a mesma ordem de grandeza dos encontrados no trabalho acima mencionado.

Resultados semelhantes foram observados para a mesma faixa de temperatura e teor de gordura de 25,1% e 30,6%. Para estes teores de gordura, os dados se ajustaram ao modelo de Bingham para a faixa de temperatura entre 275,4 K e 306,4 K, obtendo coeficientes de determinação entre 0,989 e 0,999.

Da mesma forma que para o modelo Newtoniano, os parâmetros reológicos decresceram com o aumento da temperatura. Através do reograma da figura 5.14 para o teor de gordura de 25,1%, observa-se o decréscimo na viscosidade plástica ( $\eta_b$ ) com o aumento da temperatura, indicando valores de 1028,00 mPa.s e 392,71 mPa.s nas temperaturas de 275,4 K e 306,4 K, respectivamente. Este comportamento pode ser justificado principalmente pela presença de proteínas e outras moléculas complexas, presentes no creme de leite.



**Figura 5.14: Ajuste para o modelo de Bingham para o Creme de Leite em diferentes temperaturas e teor de gordura igual a 25,1% e temperaturas entre 275,4 K e 306,4 K**

Através do gráfico acima, também é possível verificar o decréscimo da tensão de cisalhamento inicial ( $\sigma_0$ ) com o aumento da temperatura. O valor da

tensão de cisalhamento inicial ( $\sigma_0$ ) variou entre 1017,90 Pa e 342,84 Pa com a variação de temperatura e teor de gordura.

A tabela 5.10 abaixo, mostra os valores dos parâmetros reológicos ( $\sigma_0$ ) e ( $\eta_b$ ) nas diferentes concentrações e temperaturas para o creme de leite. Os coeficientes de determinação variaram entre 0,996 e 0,999.

**Tabela 5.10: Parâmetros reológicos para o creme de leite em diferentes teores de gordura e temperatura - Domínio Viscoplastico (Bingham)**

% de Gordura (% p/p)	Temperatura (K)					
	275,4	279,8	283	291,3	298	306,4
	Tensão de Cisalhamento Inicial*, $\sigma_0 \times 10^3$ (Pa)					
20,3	730,89	669,14	626,50	519,36	438,97	342,84
25,1	1028,00	914,57	830,98	633,76	452,12	392,71
30,6	1017,90	814,68	688,97	604,71	532,12	456,61
	Viscosidade Plástica*, $\eta_b \times 10^3$ (Pa.s)					
20,3	10,936	9,561	8,731	8,628	7,624	7,576
25,1	16,457	15,086	15,239	13,751	9,262	7,662
30,6	20,983	20,633	19,832	9,114	8,003	7,217

\* Válido para taxas de deformação entre 25 e 300  $s^{-1}$

Ainda através da análise dos reogramas e dos parâmetros reológicos, pode ser verificado que o aumento do teor de gordura no creme de leite influencia diretamente no aumento da viscosidade plástica ( $\eta_b$ ) e também no aumento da tensão de cisalhamento inicial ( $\sigma_0$ ). Este aumento nos valores dos parâmetros reológicos é mais acentuado em baixas temperaturas como, por exemplo, 275,4 K e 298 K, do que em temperaturas mais elevadas, acima de 298 K. Na temperatura de 275,4K houve um aumento de 39% no valor da tensão de

cisalhamento inicial e 92% no valor da viscosidade plástica ( $\eta_b$ ), enquanto que para a temperatura de 306,4 K, ocorreu um aumento de 21% no valor da tensão de cisalhamento inicial ( $\sigma_0$ ) e o valor da viscosidade plástica ( $\eta_b$ ) permaneceu constante. Este comportamento pode ser melhor verificado observando-se as figuras 5.15 e 5.16, que mostram os reogramas para o creme de leite com teor de gordura de 20,3% e 30,6%, respectivamente.

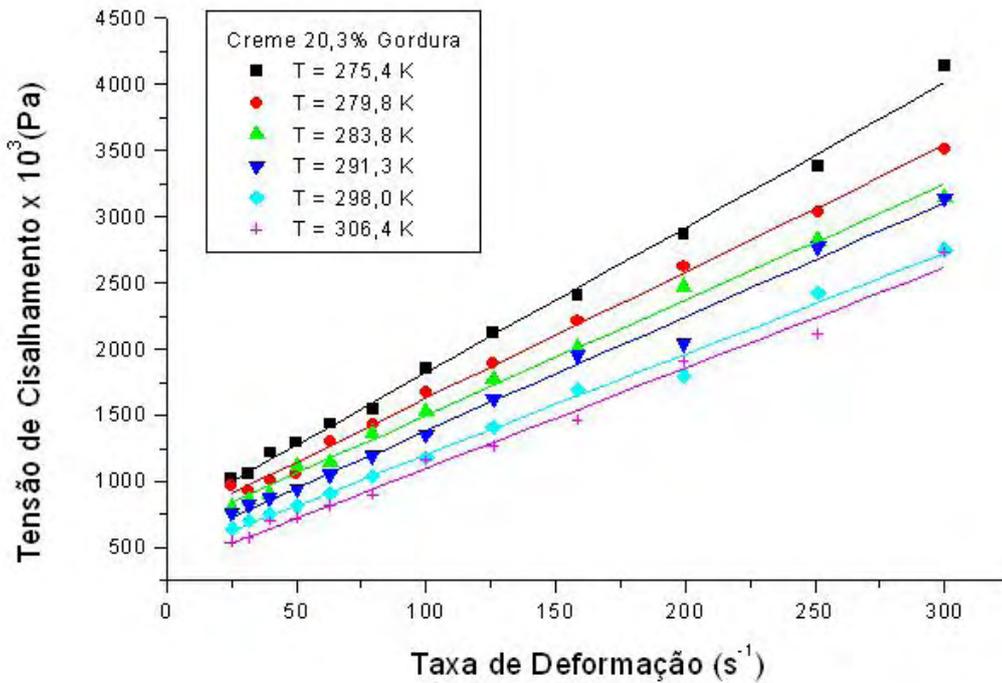


Figura 5.15: Ajuste para o modelo de Bingham para o Creme de Leite em diferentes temperaturas (275,4 K e 306,4 K) e teor de gordura igual a 20,3%

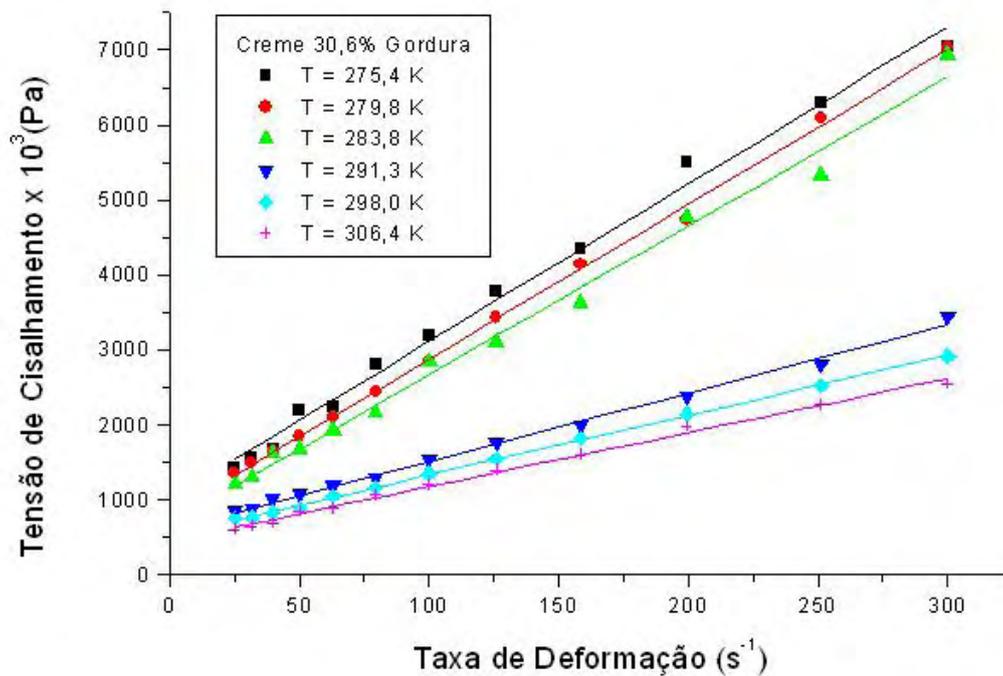


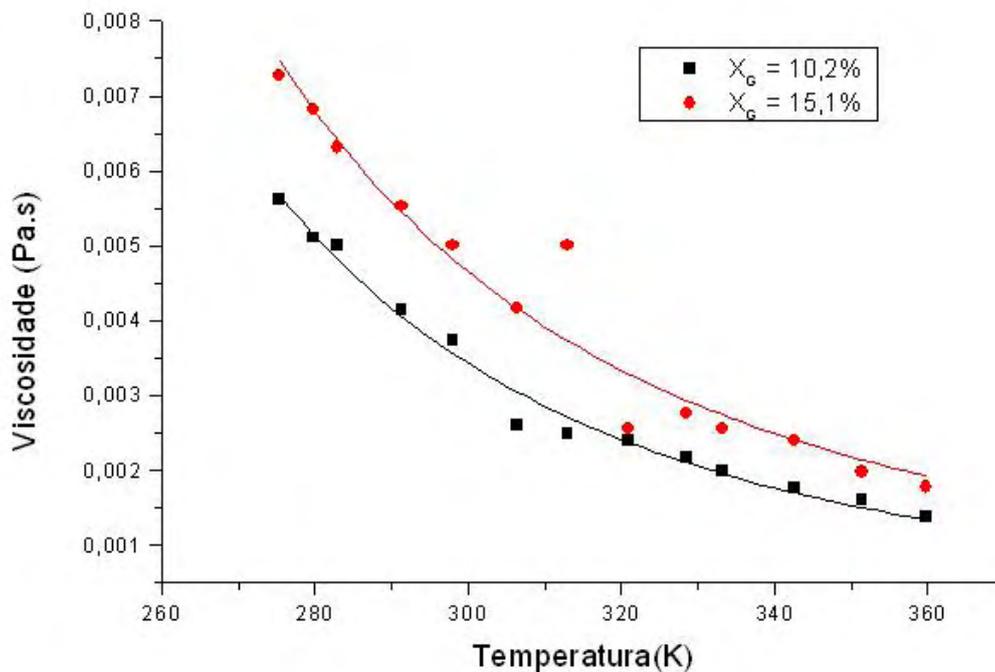
Figura 5.16: Ajuste para o modelo de Bingham para o Creme de Leite em diferentes temperaturas (275,4 K e 306,4 K) e teor de gordura igual a 30,6%

### 5.2.3 Influência da Temperatura nos parâmetros reológicos

Da mesma maneira que para o estudo da influência da temperatura nos parâmetros reológicos do leite condensado, foram testadas duas funções clássicas (Potencial e Exponencial) para estudar a influência da temperatura nos parâmetros reológicos do creme de leite. Os dados experimentais melhor se ajustaram ao modelo desenvolvido por Arrhenius (Equação 3.6 e 3.7) e, como era esperado, a viscosidade diminuiu com o aumento da temperatura.

### 5.2.3.1 Modelo de Newton

A influência da temperatura nos valores de viscosidade de Newton foi melhor correlacionada através da função exponencial de Arrhenius. Haminiuk *et al* (2005) utilizaram esta mesma correlação para estudar a influência da temperatura nos parâmetros reológicos da polpa do Araçá. O ajuste dos dados experimentais ao modelo pode ser verificado através da figura 5.17:



**Figura 5.17: Efeito da temperatura na viscosidade do creme de leite com teores de gordura de 10,2% e 15,1%**

Como se pode observar através da figura acima, a viscosidade diminuiu com o aumento da temperatura. Através do ajuste dos dados experimentais ao modelo de Arrhenius, foram determinados os valores de energia de ativação ( $E_a$ ) e o fator ( $\eta_\infty$ ) para cada concentração de gordura. Pode-se observar através da tabela 5.11, que os valores de energia de ativação ( $E_a$ ) decrescem com o aumento

da temperatura, e os valores do fator ( $\eta_{\infty}$ ) aumentam com o aumento da temperatura. Os valores de energia de ativação variaram entre 2,933 e 3,359 kcal/mol com o aumento do teor de gordura de 10,2% para 25,1%. Este resultado é semelhante ao observado por Haminiuk *et al* (2005) e Vélez-Ruiz & Barbosa-Cánovas (1997) para polpa do Araçá e leite concentrado, respectivamente, com valores obtidos da mesma ordem de grandeza dos encontrados nestes trabalhos.

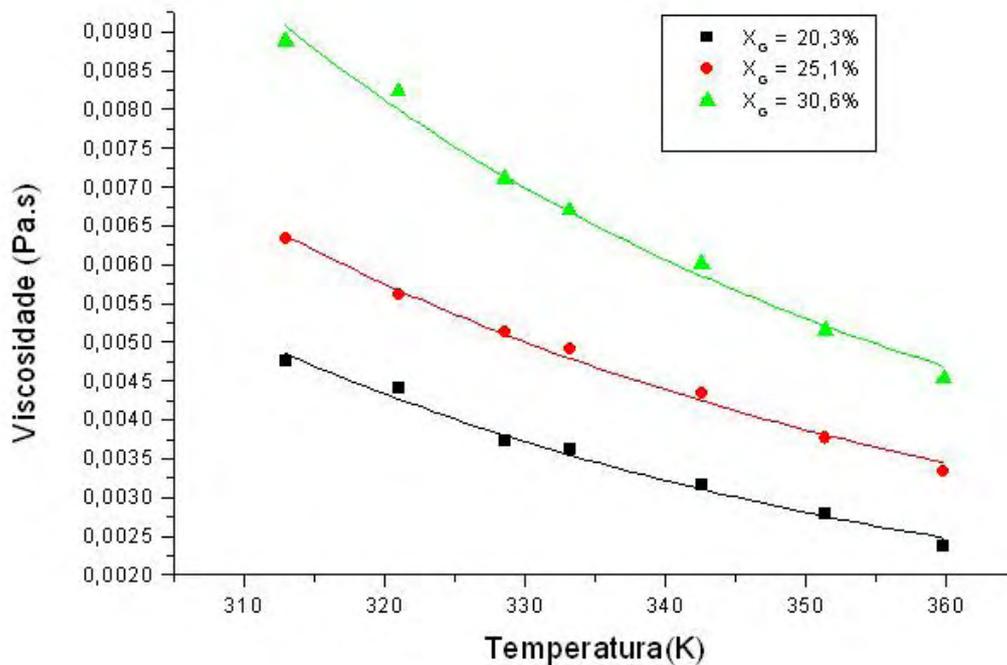
Os valores do fator ( $\eta_{\infty}$ ) variaram entre  $12,212 \times 10^{-6}$  e  $56,994 \times 10^{-6}$  Pa.s com o aumento do teor de gordura de 10,2% para 30,6%. Ambos os parâmetros se ajustaram bem à correlação utilizada com valores de  $r^2$  variando entre 0,973 e 0,997.

**Tabela 5.11: Parâmetros da Equação de Arrhenius - Domínio Newtoniano**

% de Gordura (% p/p)	$E_a$ (kcal/mol)	$\eta_{\infty}$ ( $10^6$ ) (Pa.s)	$r^2$
10,2	3,359	12,212	0,993
15,1	3,162	23,058	0,973
20,3	3,211	27,693	0,994
25,1	2,933	56,903	0,997
30,6	3,152	56,994	0,995

A partir dos resultados apresentados, pode-se afirmar que a energia de ativação ( $E_a$ ) tem pouca influência na viscosidade do creme de leite, pois se observou uma pequena variação nos valores de energia de ativação (13%), enquanto o fator ( $\eta_{\infty}$ ) apresentou variação de 466%, tendo, portanto, grande influência nos valores de viscosidade do creme de leite.

O mesmo comportamento também é observado para o creme de leite com comportamento Newtoniano, com teores de gordura de 20,3%, 25,1% e 30,6%. A figura 5.18 abaixo mostra a diminuição da viscosidade com o aumento da temperatura.



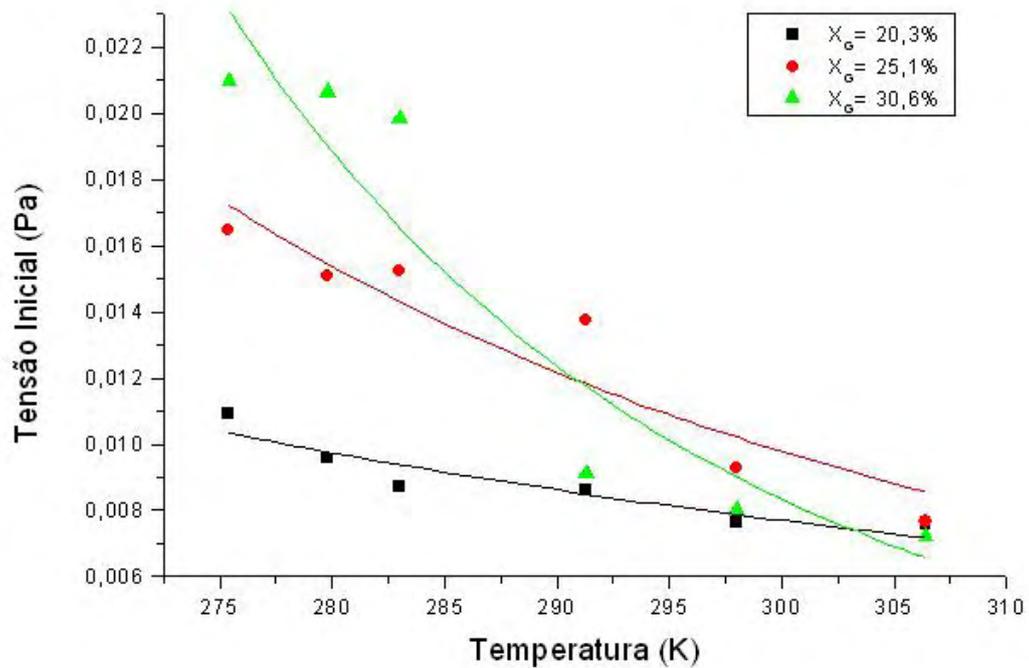
**Figura 5.18: Efeito da temperatura na viscosidade do creme de leite com teores de gordura de 20,3%, 25,1% e 30,6%**

### 5.2.3.2 Modelo de Bingham

A influência de temperatura nos parâmetros reológicos ( $\sigma_0$ ) e ( $\eta_b$ ) também foi melhor correlacionada através da função exponencial (Equação 3.7). Ibarz (1996) utilizou esta mesma correlação para estudar a influência da temperatura nos parâmetros reológicos da Ameixa Selvagem (*Sloe Fruit*), que também melhor se ajustou ao modelo de Bingham.

A figura 5.19 abaixo, mostra o ajuste da equação 3.7 aos valores da tensão inicial ( $\sigma_0$ ). Observa-se pela figura que os dados melhor se ajustaram à equação para os teores de gordura de 20,3% e 25,1%, pois para o teor de gordura de 30,6% se observou uma queda mais abrupta em baixas temperaturas (275,4 K a

283 K) quando comparado aos outros teores de gordura, ou seja, a temperatura teve maior influência para o creme de leite com teores de gordura de 25,1% e 30,6%.



**Figura 5.19: Efeito da temperatura na tensão inicial do creme de leite com teores de gordura de 20,3%, 25,1% e 30,6%**

Os parâmetros da equação 3.7 podem ser vistos nas tabelas 5.12 e 5.13. Assim como para o modelo Newtoniano, a energia de ativação apresentou pouca influência, tendo valores praticamente constantes. Os coeficientes de determinação variaram entre 0,868 e 0,991.

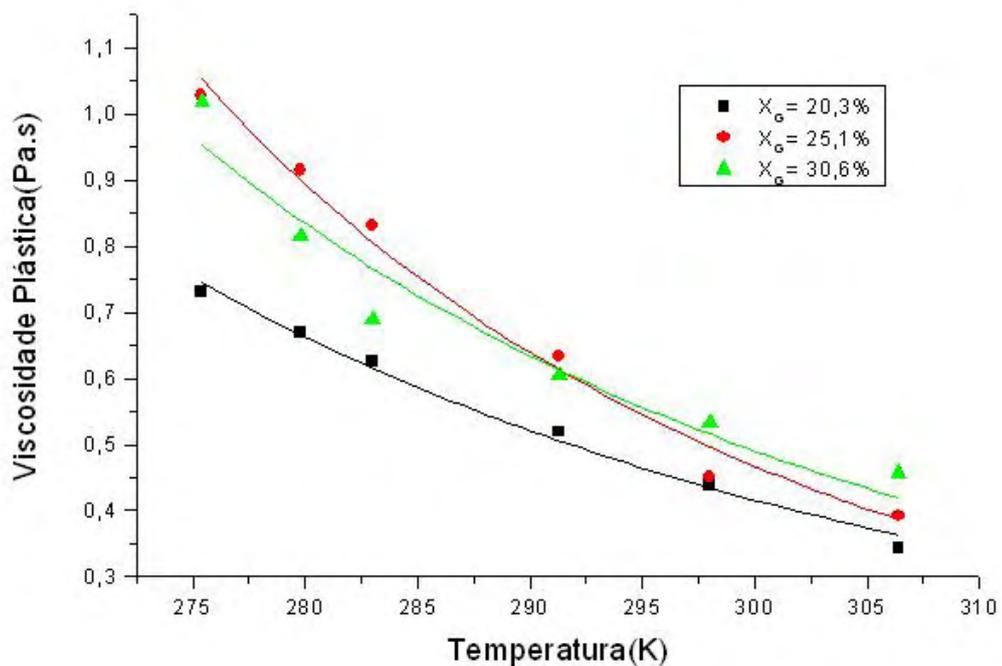
**Tabela 5.12: Parâmetros da Equação 3.7 – Domínio Viscoplastico (Bingham)**

% de Gordura (% p/p)	$E_a$ (kcal/mol)	$\sigma_0$ ( $10^3$ ) (Pa)	$r^2$
20,3	3,885	612,37	0,991
25,1	5,416	52,67	0,988
30,6	4,431	288,83	0,940

**Tabela 5.13: Parâmetros da Equação 3.7 – Domínio Viscoplastico (Bingham)**

% de Gordura (% p/p)	$E_a$ (kcal/mol)	$\eta_B (10^3)$ (Pa.s)	$r^2$
20,3	1,9593	284,389	0,868
25,1	3,7614	17,388	0,890
30,6	6,7752	0,093	0,887

A figura 5.20 mostra o ajuste dos valores da viscosidade plástica ( $\eta_b$ ) à equação 3.7. Observa-se pela análise da figura 5.20 e da tabela 5.13, uma grande influência da temperatura na viscosidade plástica, assim como nos valores de tensão de cisalhamento inicial. Este parâmetro é mais influenciado pela temperatura no creme de leite com maiores teores de gordura. Da mesma maneira que no estudo de Ibarz (1996), a energia de ativação aumentou com o aumento do teor de gordura, como também se observou um maior efeito do aumento da temperatura nas amostras com maior teor de gordura.



**Figura 5.20: Efeito da temperatura na viscosidade plástica do creme de leite com teores de gordura de 20,3%, 25,1% e 30,6%**

#### 5.2.4 Influência do teor de gordura nos parâmetros reológicos

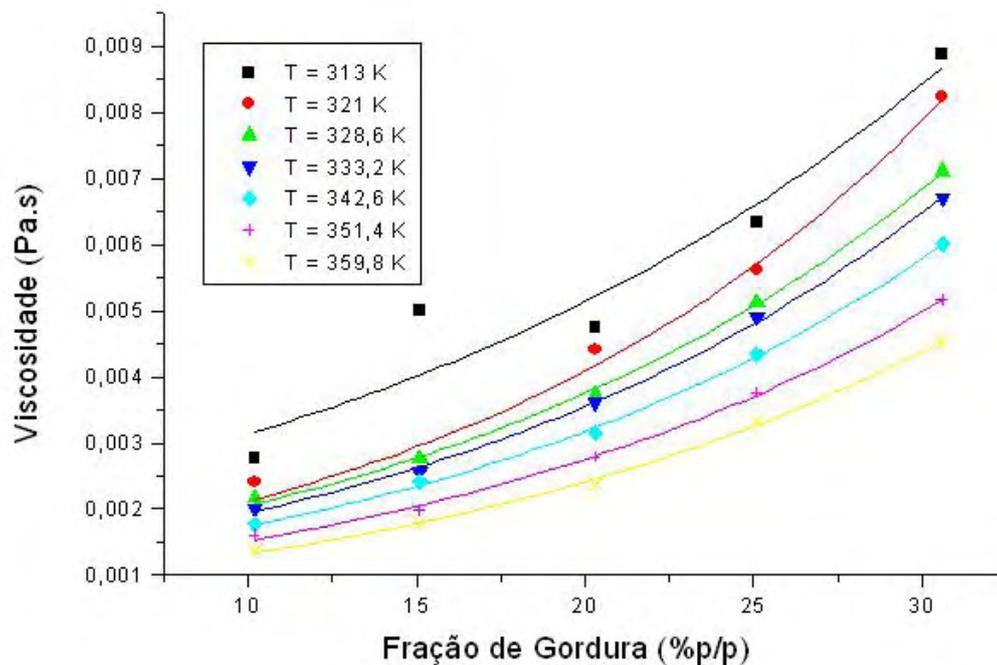
A influência do teor de gordura nos parâmetros reológicos do creme de leite foi determinada testando as mesmas funções clássicas utilizadas para determinar a influência de temperatura nos parâmetros reológicos, ou seja, foram testadas as funções potencial e exponencial para o ajuste das relações sobre os parâmetros reológicos nos modelos de Newton e Bingham.

Thomaz (2002), Cabral (2000) e Vélez-Ruiz & Barbosa-Cánovas (1997) obtiveram resultados semelhantes estudando a influência da fração de água no extrato de café, ovo líquido e leite concentrado, respectivamente, onde observaram que os valores dos parâmetros reológicos para os modelos de Newton e Bingham diminuem com a diminuição do teor de gordura do creme de leite.

##### 5.2.4.1 Modelo de Newton

A influência do teor de gordura nos valores de viscosidade de Newton foi melhor correlacionada através da função exponencial (equação 3.9), onde o parâmetro (C) da equação é o teor de gordura do creme de leite ( $X_G$ ). Giner *et al* (1996) utilizaram esta mesma correlação para estudar a influência da concentração de sólidos solúveis no suco de cereja.

O ajuste dos dados experimentais ao modelo exponencial pode ser verificado através da figura 5.21:



**Figura 5.21: Efeito da fração de gordura na viscosidade do creme de leite na faixa de temperatura entre 313 K e 359,8 K**

Como pode se observar através da figura 5.21, a viscosidade aumenta com o aumento do teor de gordura em toda a faixa de temperatura estudada (313 K a 359,8 K). Foi observado o mesmo comportamento para o creme de leite em baixas temperaturas (275,4 K a 306,4 K), que possui comportamento Newtoniano. Os valores dos parâmetros A e B podem ser vistos na tabela 5.14, que mostra uma boa correlação entre os dados experimentais ( $r^2 > 0,929$ ). Resultados semelhantes foram observados nos trabalhos de Cabral (2000), Guerrero & Alzamora (1998) e Vélez-Ruiz & Barbosa-Cánovas (1997) em estudos de extrato de café, purês de frutas e leite concentrado, respectivamente.

**Tabela 5.14: Parâmetros da Equação 3.9 – Domínio Newtoniano**

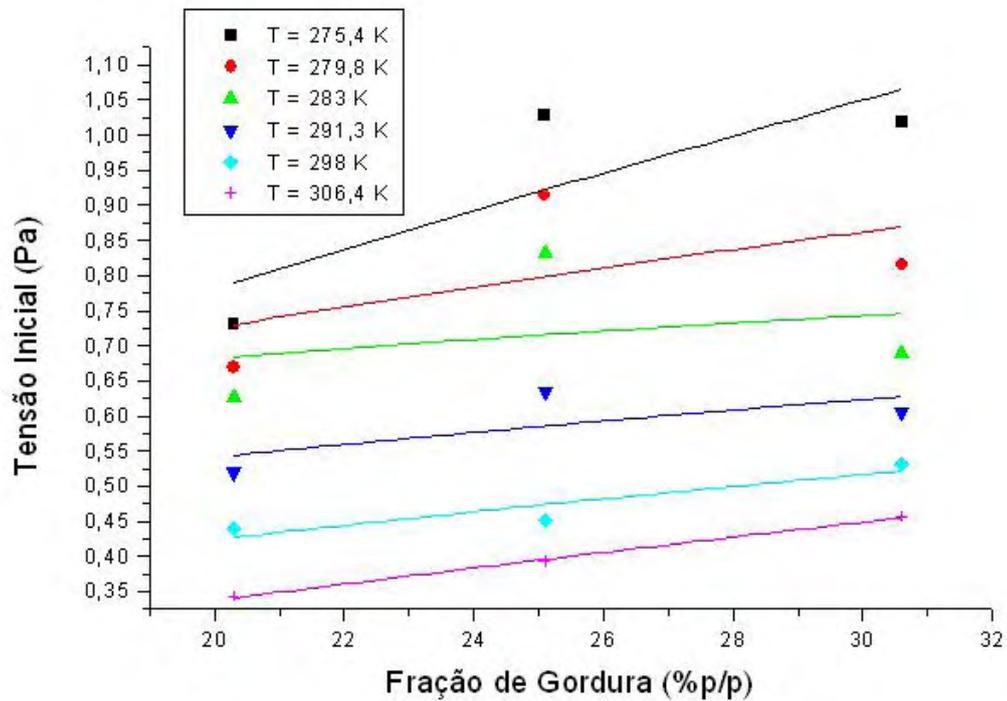
Temperatura A ( $10^4$ ) (K)	(Pa.s)	B (-)	$r^2$
275,4	32,4	0,0535	1
279,8	27,9	0,0592	1
283	31	0,0471	1
291,3	22,7	0,0587	1
298	20,4	0,0596	1
306,4	4,5	0,1479	1
313	19,1	0,0496	0,929
321	11	0,0657	0,987
328,6	11,2	0,0602	0,999
333,2	10,6	0,0604	0,999
342,6	9,52	0,0602	0,999
351,4	8,38	0,0594	0,998
359,8	7,26	0,0599	0,998

#### 5.2.4.2 Modelo de Bingham

Diferentemente do modelo de Newton, a influência do teor de gordura nos parâmetros reológicos do modelo de Bingham foi melhor correlacionada através da função do tipo potencial, (equação 3.10), onde o parâmetro (C) da equação é o teor de gordura do creme de leite ( $X_G$ ):

Cabral (2000) utilizou esta mesma correlação para estudar a influência da concentração de sólidos solúveis no extrato de café no domínio Newtoniano, obtendo valores de coeficiente de determinação acima de 0,99.

O ajuste dos dados experimentais ao modelo do tipo potencial pode ser verificado através da figura 5.22 para os valores de tensão inicial ( $\sigma_0$ ):



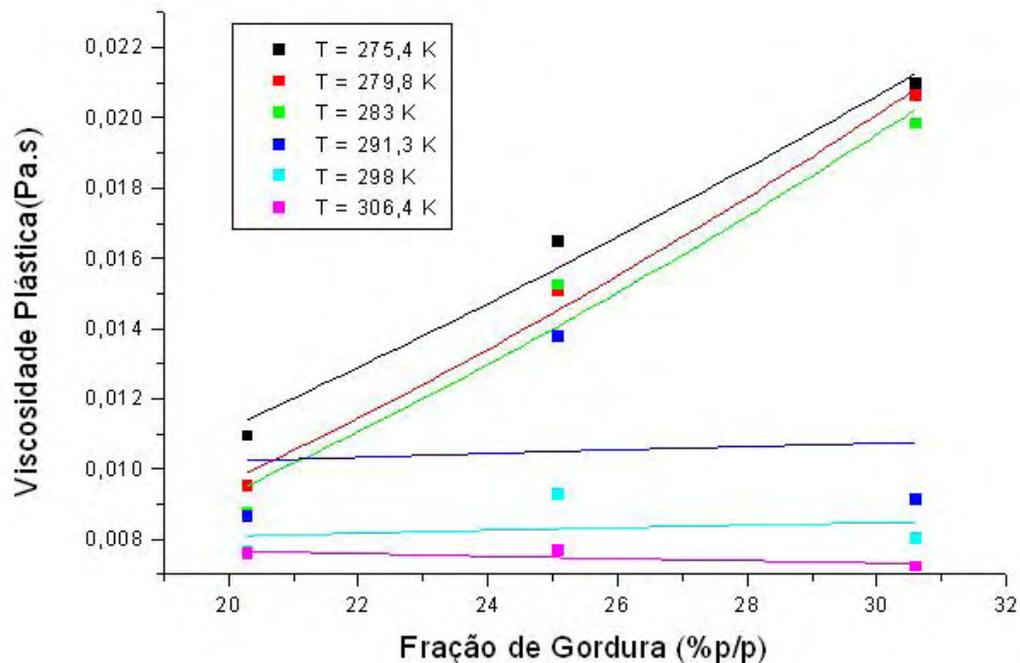
**Figura 5.22: Efeito da fração de gordura na tensão inicial do creme de leite na faixa de temperatura entre 275,4 K e 306,4 K**

Como se verifica através da figura 5.22, o aumento do teor de gordura tem pouca influência nos valores de tensão inicial ( $\sigma_0$ ) quando se compara com a influência da temperatura neste parâmetro reológico. Os valores dos parâmetros A e B estão na tabela abaixo:

**Tabela 5.15: Parâmetros da Equação 3.10 – Domínio Viscoplastico (Bingham)**

Temperatura (K)	A ( $10^4$ ) (Pa.s)	B (-)	$r^2$
275,4	885,6	0,727	0,702
279,8	2026	0,426	0,342
283	3643,3	0,209	0,093
291,3	1908,1	0,348	0,514
298	985,6	0,487	0,859
306,4	410,3	0,703	0,997

Para os valores de viscosidade plástica ( $\eta_b$ ), a influência do teor de gordura se mostrou mais pronunciada na faixa mais baixa de temperatura deste estudo, ou seja, na faixa de temperatura entre 275,4 K e 283 K, onde o modelo do tipo potencial apresentou bons coeficientes de determinação ( $r^2 > 0,965$ ). Para temperaturas acima desta faixa observou-se que os dados não se ajustaram bem ao modelo, como também pode ser observada pouca influência do teor de gordura nos valores de viscosidade plástica ( $\eta_b$ ). Este comportamento pode ser verificado através da figura 5.23 e da tabela 5.16, com os valores calculados dos parâmetros A, B e do coeficiente de determinação  $r^2$ .



**Figura 5.23: Efeito da fração de gordura na viscosidade plástica do creme de leite na faixa de temperatura entre 275,4 K e 306,4 K**

**Tabela 5.16: Parâmetros da Equação 3.10 – Domínio Viscopoplástico (Bingham)**

Viscosidade Plástica			
Temperatura (K)	A ( $10^4$ ) (Pa.s)	B (-)	$r^2$
275,4	1,19	1,516	0,984
279,8	42,2021	1,813	0,992
283	38,5693	1,831	0,965
291,3	71,3	0,120	0,001
298	57,4	0,114	0,055
306,4	107,7	-0,113	0,550

5.2.5 Efeito combinado da temperatura e teor de gordura nos parâmetros reológicos do creme de leite

Através dos resultados obtidos e discutidos acima, pode-se afirmar que a temperatura e o teor de gordura são fatores que afetam os parâmetros reológicos do creme de leite. É importante salientar, ainda, que a correlação destes dois parâmetros é de fundamental importância para a utilização em processos industriais, como dimensionamento de trocadores de calor a placas e bombas, e em processos que envolvam concentração, secagem e tratamento térmico.

Com o objetivo de se obter o modelo mais adequado para se analisar o efeito da temperatura e do teor de gordura nos parâmetros reológicos do creme de leite nos domínios Newtoniano e Viscopoplástico, foram ajustados os dois modelos descritos pelas equações (3.12) e (3.13).

A faixa de temperatura e teor de gordura considerada para o estudo do comportamento combinado são as mesmas faixas de estudo de cada parâmetro individual, ou seja, faixa de temperatura entre 275,4 e 359,8 K e faixa de teor de gordura entre 10,2% e 30,6%. As constantes das equações foram obtidas através de

regressão não-linear com o auxílio do software STATISTICA versão 5.0 baseado no método de quasi-Newton.

#### 5.2.5.1 Comportamento Newtoniano

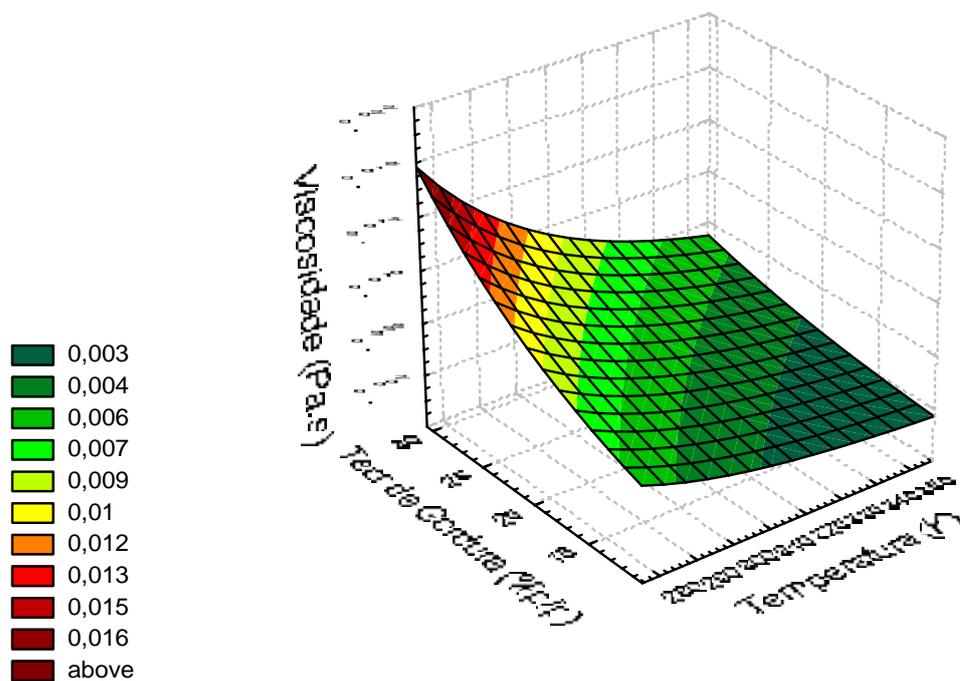
A função obtida para a viscosidade em função de faixa de temperatura e teor de gordura foi ajustada pela equação 3.13 e representada pela equação 5.1 abaixo, onde o valor do coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,921$ ) confirma o bom ajuste das constantes ao modelo:

$$\eta = 10,2 \times 10^{-6} * \exp\left(\frac{3068,736}{1,98 * T}\right) * \exp(5,978 \times 10^{-2} * X_G) \quad (5.1)$$

Onde: T é a temperatura absoluta e  $X_G$  é a fração de gordura.

Cabral (2000), Vélez-Ruiz & Barbosa-Cánovas (1997) e Ibarz *et al*, (1996) testaram estes dois modelos e encontraram a relação do tipo exponencial para melhor descrever o comportamento combinado do extrato de café, leite concentrado e ameixa selvagem (*Sloe Fruit*), respectivamente.

Os dados experimentais da viscosidade estão representados na figura 5.24 abaixo. Pode-se concluir que a viscosidade do creme de leite é mais influenciada pela fração de gordura se comparada com a influência da temperatura. Da mesma forma que no estudo do leite concentrado citado anteriormente, observa-se um efeito oposto dos parâmetros temperatura e fração de gordura. Enquanto que o aumento da fração de gordura aumenta o valor da viscosidade, o aumento da temperatura diminui o valor da viscosidade.



**Figura 5.24: Influência da temperatura e fração de gordura na viscosidade do creme de leite – Comportamento Newtoniano**

#### 5.2.5.2 Comportamento Viscoplastico – Modelo de Bingham

##### 5.2.5.2.1 Tensão de cisalhamento inicial

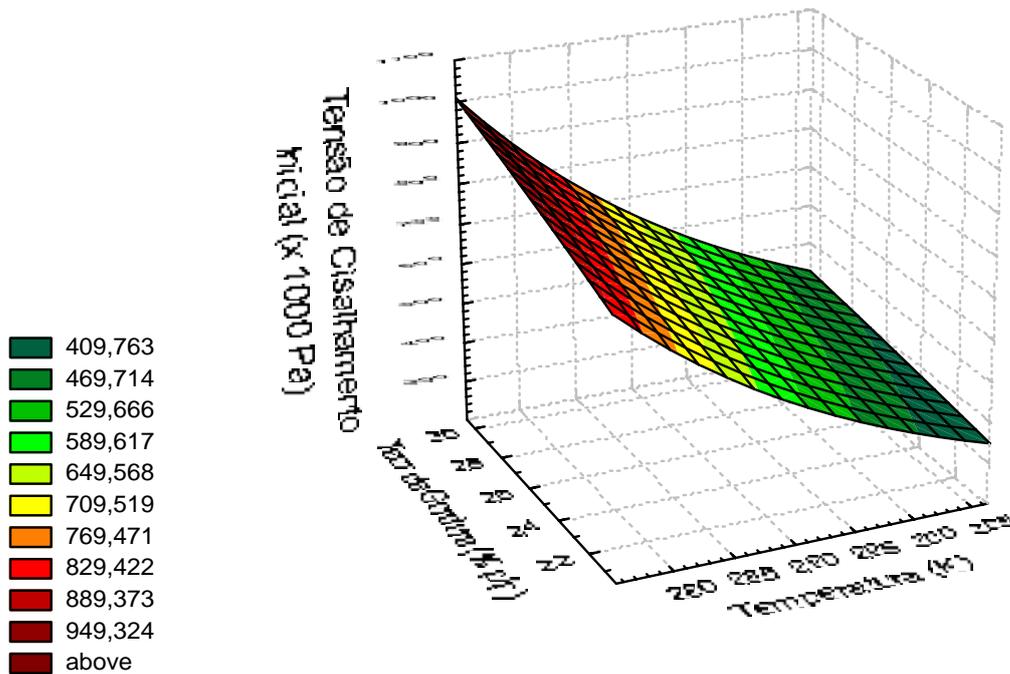
A função obtida para a tensão de cisalhamento inicial em função de faixa de temperatura e teor de gordura foi ajustada pela equação 3.12 e representada pela equação 5.2 abaixo, onde o valor do coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,949$ ) confirma o bom ajuste das constantes ao modelo:

$$\sigma_0 = 37,6 \times 10^{-6} * \exp\left(\frac{4648,16}{1,98 * T}\right) * X_G^{0,487} \quad (5.2)$$

Onde: T é a temperatura absoluta e  $X_G$  é a fração de gordura.

Os dados experimentais da tensão de cisalhamento inicial estão representados na figura 5.25 abaixo. Pode-se concluir que a tensão de cisalhamento inicial do creme de leite é mais influenciada pela temperatura se comparada com a

influência da fração de gordura. Pela análise qualitativa do gráfico, observa-se que há variação na tensão de cisalhamento inicial somente quando há variação de temperatura, pois o eixo do teor de gordura é praticamente constante a uma dada temperatura, exercendo pouca influência na tensão de cisalhamento inicial.



**Figura 5.25: Influência da temperatura e fração de gordura na Tensão de Cisalhamento inicial do creme de leite – Comportamento Viscoplastico**

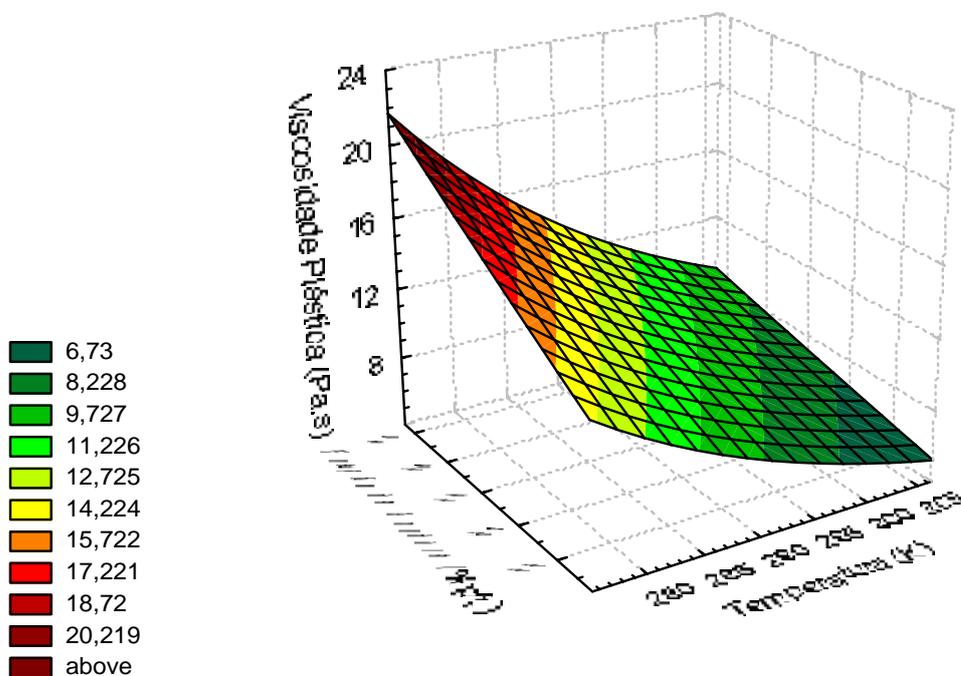
#### 5.2.5.2.2 Viscosidade Plástica

Da mesma forma que para o estudo da tensão de cisalhamento inicial, a função obtida para a viscosidade plástica em função de faixa de temperatura e teor de gordura foi ajustada pela equação 3.12 e representada pela equação 5.3 abaixo, onde o valor do coeficiente de determinação  $r^2 = 0,904$  confirma o bom ajuste das constantes ao modelo:

$$\eta_B = 37,5 \times 10^{-9} * \exp\left(\frac{4883,35}{1,98 * T}\right) * X_G^{1,261} \quad (5.3)$$

Onde: T é a temperatura absoluta e X<sub>G</sub> é a fração de gordura.

Os dados experimentais da viscosidade plástica estão representados na figura 5.26 abaixo. Pode-se concluir, através da análise da figura, que a viscosidade plástica do creme de leite é influenciada tanto pela temperatura quanto pela fração de gordura. Como se pode observar pela análise qualitativa do gráfico, esta influência é mais pronunciada em baixas temperaturas (275,4 K a 291,3 K) e altas concentrações de gordura (acima de 25%), onde a inclinação do gráfico é maior quando comparada a altas temperaturas (acima de 291,3 K) e baixas concentrações de gordura. Ainda pode ser observado pelo gráfico que, em altas temperaturas, a fração de gordura presente no creme de leite exerce pouca influência na viscosidade plástica.



**Figura 5.26: Influência da temperatura e fração de gordura na Viscosidade Plástica do creme de leite – Comportamento Viscoplastico**

## 6. CONCLUSÕES

1. O estudo das propriedades reológicas do leite condensado revelou comportamento Pseudoplástico sem tensão de cisalhamento inicial em toda a faixa de temperatura em estudo (275 a 343 K). Os parâmetros reológicos foram ajustados utilizando-se o modelo de Otswald-De-Waele (Lei da Potência), obtendo um bom ajuste dos dados experimentais com coeficientes de determinação  $r^2 > 0,999$ . Os reogramas evidenciaram a presença de tixotropia no leite condensado em todas as faixas de temperatura de estudo. Ainda da análise dos reogramas observou-se que a tixotropia é dependente da temperatura.
2. A influência da temperatura sobre os parâmetros reológicos do leite condensado foi representada por uma função exponencial (Equação de Arrhenius), obtendo-se um bom ajuste dos dados experimentais ( $r^2 > 0,994$ ).
3. O estudo das propriedades reológicas do creme de leite revelou comportamento Newtoniano e comportamento Viscoplastico, dependendo da temperatura e teor de gordura. Os reogramas apresentaram comportamento Newtoniano para a faixa de gordura entre 10,2% e 15,1% em todas as faixas de temperatura deste estudo, ou seja, entre 275,4 e 359,8K. O mesmo comportamento ocorreu para as amostras com teor de gordura entre 20,3% e 30,6% nas faixas de temperatura entre 313 K e 359,8 K. O creme de leite exibiu comportamento Viscoplastico para os teores de gordura de 20,3%, 25,1% e 30,2% nas faixas de temperatura entre 275,4 K e 306,4 K. Os parâmetros reológicos foram ajustados utilizando-se o modelo de Bingham, obtendo um bom ajuste dos dados experimentais com coeficientes de determinação  $r^2 > 0,989$ . Os reogramas não evidenciaram a presença de tixotropia no creme de leite.

4. A influência da temperatura sobre os parâmetros reológicos do creme de leite foi representada por funções exponenciais (Equação de Arrhenius), obtendo-se um bom ajuste dos dados experimentais ( $r^2 > 0,940$ ).

5. O estudo do efeito do teor de gordura nos parâmetros reológicos do creme de leite com comportamento Newtoniano e Viscoplastico foi realizado utilizando-se funções exponenciais e potenciais. Para o comportamento Newtoniano e para o domínio viscoplastico com temperaturas entre 275,4 K e 283 K, o ajuste das equações apresentou uma boa determinação dos dados experimentais. Para temperaturas acima desta faixa observou-se que o modelo não se ajustou bem aos dados, como também pode ser observada pouca influência do teor de gordura nos valores de viscosidade plástica.

6. Através do estudo do efeito combinado entre temperatura e teor de gordura na reologia do creme de leite, pode-se concluir que ambos influenciam nos parâmetros reológicos do fluido. Foram determinadas equações matemáticas para correlacionar os parâmetros reológicos do creme de leite em função da temperatura e do teor de gordura. Os modelos com as respectivas faixas de validade para temperatura e teor de gordura são representados abaixo:

Newton:

T = 275,4 K a 359,8 K e teor de gordura entre 10,2% e 15,1%

T = 313 K a 359,8 K e teor de gordura entre 20,3% e 30,6%

$$\eta = 10,2 \times 10^{-6} * \exp\left(\frac{3068,736}{1,98 * T}\right) * \exp(5,978 \times 10^{-2} * X_G)$$

Bingham:

T = 275,4 K e 306,4 K e teor de gordura entre 20,3% e 30,6%

$$\sigma_0 = 37,6 \times 10^{-6} * \exp\left(\frac{4648,16}{1,98 * T}\right) * X_G^{0,487}$$

$$\eta_B = 37,5 \times 10^{-9} * \exp\left(\frac{4883,35}{1,98 * T}\right) * X_G^{1,261}$$

## 7. SUGESTÕES

Após o desenvolvimento, análise dos resultados e conclusões deste trabalho, novos estudos mostram-se interessantes para ampliar a compreensão destes e de outros fenômenos envolvendo produtos lácteos como o leite condensado e o creme de leite. Daí tem-se as seguintes sugestões:

1. Estudo de hidrodinâmica para determinação do fator de atrito de Fanning para o regime Pseudoplástico do leite condensado para verificação da concordância com os resultados dos parâmetros reológicos obtidos neste trabalho.
2. Estudo de transferência de calor para a determinação experimental do coeficiente convectivo de transferência de calor para o leite condensado no regime Pseudoplástico, onde praticamente não existem correlações.
3. Estudo da influência do tempo nos parâmetros reológicos do leite condensado (Tixotropia).
4. Determinação experimental da perda de carga em acessórios e válvulas para escoamento com leite condensado no regime pseudoplástico, onde praticamente não existem correlações.
5. Estudo de hidrodinâmica para determinação do fator de atrito de Fanning nas faixas Newtoniana e Viscoplastica do creme de leite para verificação da concordância com os resultados dos parâmetros reológicos obtidos neste trabalho.
6. Estudo de transferência de calor para a determinação experimental do coeficiente convectivo de transferência de calor para o creme de leite nos regimes Newtoniano e Viscoplastico, onde praticamente não existem correlações.
7. Estudo da mudança brusca nos valores dos parâmetros reológicos do creme de leite nas faixas de temperatura entre 303 e 323 K.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABU-JDAYIL, B., MOHAMEED, H.A., EASSA, A., Rheology of wheat starch-milk-sugar systems: effect of starch concentration, sugar type and concentration, and milk fat content. *Journal of Food Engineering*, v.64, p.207-212, 2004.
- ABU-JDAYIL, B., MOHAMEED, H.A., EASSA, A., Rheology of starch-milk-sugar systems: effect of heating temperature. *Carbohydrate Polymers*, v.55, p.307-314, 2004.
- ADORNO, R.A.C. Reologia de Sucos de Frutas Tropicais: Manga, Maracujá, Mamão e Goiaba. *Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP*, 1997.
- ARSLAN, E., YENER, M.E., ESIN, A., Rheological characterization of tahin/pekmez (sesame paste/concentrated grape juice) blends. *Journal of Food Engineering*, v.69, p.167-172, 2005.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G.V. & VÉLEZ-RUIZ, J.F., Rheological Properties of Concentrated Milk as a Function of Concentration, Temperature and Storage Time. *Journal of Food Engineering*, v.35, p.177-190, 1998.
- BIRD, R.B., STEWART, W.E., LIGHTFOOT, E.N. Transport Phenomena. *John Wiley & Sons, Inc, New York – London*, p. 780, 1960.
- BORWANKAR, R.P., Food Texture and Rheology: A Tutorial Review. *Journal of Food Engineering*, v.16, p.1-16, 1992.
- BOURNE, M.C., Calibration of Rheological Techniques Used for Foods. *Journal of Food Engineering*, v.16, p.151-163, 1992.

- BRANCO, I.G. Suco de Laranja Concentrado – Comportamento Reológico a Baixas Temperaturas. *Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, 1995.*
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade de Creme de Leite. Portaria nº 146, de 07 de março de 1996. *Diário Oficial da União*, 11/03/1996, Seção 1, p. 3977-3978.
- CABRAL, R.A.F. Influência da temperatura e fração de água nos parâmetros reológicos do extrato de café. *Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia e Ciência de Alimentos, UNESP, 2000.*
- CHANG, Y.H. & HARTEL, R.W., Flow Properties of Freeze-concentrated Skim Milk. *Journal of Food Engineering*, v.31, p.375-386, 1997.
- DONTULA, P., MACOSKO C.W., and SCRIVEN L.E., Origins of concentric cylinders viscometry. *The Society of Rheology, Inc. J. Rheol.*, v.49, p.807-818, 2005.
- GALLEGOS C., FRANCO J.M., Rheology of food, cosmetics and pharmaceuticals. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, v.4, p.288-293, 1999.
- GINER, J., IBARZ, A., GARZA, S. & XHIAN-QUAN, S., Rheology of Clarified Cherry Juices. *Journal of Food Engineering*, v.30, p.147-154, 1996.
- GRATÃO, A.C.A., BERTO, M.I., SILVEIRA JÚNIOR, V., Reologia do Açúcar Líquido Invertido: Influência da temperatura na viscosidade. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.24, p.652-656, 2004.
- GUERRERO, S.N. & ALZAMORA, S.M. Effect of pH, temperature and glucose addition on flow behavior of fruit purées: I. Banana purée. *Journal of Food Engineering*, v.33, p.239-256, 1997.

- GUERRERO, S.N. & ALZAMORA, S.M. Effect of pH, temperature and glucose addition on flow behavior of fruit purées: II. Peach, Papaya and Mango Purées. *Journal of Food Engineering*, v.37, p.77-101, 1998.
- GUT, J.A.W., PINTO, J.M., GABAS, A.L., and TELIS-ROMERO, J., Pasteurization of egg yolk in plate heat exchangers: thermophysical properties and process simulation. In: *Annual Meeting, Nov. 16-21, Session 123, San Francisco, CA*: [s.n.], 2003.
- HAMINIUK, C.W.I., SIERAKOWSKI, M.R., VIDAL, J.R.M.B., MASSON, M.L., Influence of temperature on the rheological behavior of whole araçá pulp (*Psidium cattleianum* sabine). *LWT*, v.39, p.426-430, 2006.
- HERNANDEZ, E., JOHNSON, C.S.C.J., CARTER, R.D., Viscosity Changes in Orange Juice After Ultrafiltration and Evaporation. *Journal of Food Engineering*, v.25, p.387-396, 1995.
- İBANOĞLU, Ş., İBANOĞLU, E., Rheological properties of cooked tarhana, a cereal-based soup. *Food Research International*, v.32, p.29-33, 1999.
- IBARZ, A., GARVIN, A. & COSTA, J., Rheological Behaviour of Sloe (*Prunus Spinosa*) Fruit Juices. *Journal of Food Engineering*, v.27, p.423-430, 1996.
- JOYE, D.D., Shear rate and viscosity corrections for a Casson fluid in cylindrical (Couette) geometries. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.267, p.204-210, 2003.
- KRISTENSEN, D., JENSEN, P.Y., MADSEN, F., BIRDI, K.S. Rheology and Surface Tension of Selected Processed Dairy Fluids: Influence of Temperature. *Journal of Dairy Science*, v.80, p.2282-2290, 1997.

- KULKARNI, C., BELSARE, N., LELE, A., Studies on shrikhand rheology. *Journal of Food Engineering*, v.74, p.169-177, 2006.
- LOZANO, J.E. and IBARZ, A., Thixotropic Behaviour of Concentrated Fruit Pulps. *Lebensm. Wiss. Und. Technol*, v.27, p.16-18, 1994.
- MOHAMEED, H.A., ABU-JDAYIL, B., EASSA, A.M., Flow properties of corn starch-milk-sugar system prepared at 368.15 K. *Journal of Food Engineering*, v.77, p.958-964, 2006.
- MOTHÉ, C.G., RAO, M.A., Rheological behavior of aqueous dispersions of cashew gum and gum arabic: effect of concentration and blending. *Food Hydrocolloids*, v.13, p.501-506, 1999.
- MOURA, S.C.S.R., VITALI, A.A., FRANÇA, V.C.L., Propriedades Termofísicas de Soluções – Modelos Similares a Creme de Leite. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.21, p.209-215, 2001.
- PAGÁN, J., IBARZ, A., Extraction and rheological properties of pectin from fresh peach pomace. *Journal of Food Engineering*, v.39, p.193-201, 1999.
- PENNA, A.L.B., SIVIERI, K., OLIVEIRA, M.N., Relation between quality and rheological properties of lactic beverages. *Journal of Food Engineering*, v.49, p.7-13, 2001.
- PRENTICE, J.H., Dairy Rheology – A Concise Guide, *V.C.H. Publishers Inc.*, p. 165, 1992.
- RAMOS, A.M. & IBARZ, A., Density of Juice and Fruit Puree as a Function of Soluble Solids Content and Temperature. *Journal of Food Engineering*, v.35, p.57-63, 1998.

- RAO, M.A., Rheology of fluid and semisolid foods: principles and applications – Food Engineering Series, 1<sup>a</sup> ed., *Aspen Publishers, Inc.*, 1999.
- RAO, M.A., RIZVI, S.S.H., Engineering Properties of Foods, 2<sup>a</sup> ed., *Marcel Dekker Inc.*, p. 531, 1995.
- STEFFE, J.F. Rheological Methods in Food Process Engineering, 2<sup>a</sup> ed., *Freeman Press*, p. 418, 1996.
- TABILO-MUNIZAGA, G., BARBOSA-CÁNOVAS, G.V., Rheology for the food industry. *Journal of Food Engineering*, v.67, p.147-156, 2005.
- TELIS-ROMERO, J., CABRAL, R.A.F., GABAS, A.L. and TELIS, V.R.N. Rheological Properties and Fluid Dynamics of Coffee Extract. *Journal of Food Process Engineering*, v.24, p.217-230, 2001.
- TELIS-ROMERO, J., TELIS, V.R.N. AND YAMASHITA, F. Friction Factors and Rheological Properties of Orange Juice. *Journal of Food Engineering*, v.40, p.101-106, 1999.
- TELIS-ROMERO, J., THOMAZ, C.E.P., BERNARDI, M., TELIS, V.R.N, GABAS, A.L. Rheological properties and fluid dynamics of Egg Yolk. *Journal of Food Engineering*, v.74, p.191-197, 2006.
- TETRA PAK PROCESSING SYSTEMS AB: Dairy Processing Handbook, Lund, Suécia, 1995.
- VARNAM, A.H. and SUTHERLAND, J.P., Milk and milk products: technology, chemistry and microbiology, Vol.1 – Food Products Series, 1<sup>a</sup> ed., *Chapman & Hall*, 1994.

- VÉLEZ-RUIZ, J.F., BARBOSA-CÁNOVAS, G.V., Effects of concentration and temperature on the rheology of concentrated milk. *American Society of Agricultural Engineers*, v.40, p.1113-1118, 1997.
- VIDAL, J.R.M.B., GASPARETTO, C.A., Comportamento Reológico da Polpa de Manga (*Mangífera indica* L) – Efeito dos Sólidos Insolúveis. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v.20, n.2, 2000.
- VIDAL, J.R.M.B., PELEGRINE, D.H., GASPARETTO, C.A., Efeito da temperatura no comportamento reológico da polpa de manga (*mangífera indica* L-Keitt). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v.24, p.039-042, 2004.
- WALSTRA, P., VLIET, T.V., Relationship Between Viscosity and Fat Content of Milk and Cream. *Journal of Texture Studies*, v.11, p.65-68, 1980.
- YANES, M., DURÁN, L., COSTELL, E., Rheological and optical properties of commercial chocolate milk beverages. *Journal of Food Engineering*, v.51, p.229-234, 2002.