

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

**AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA E FÍSICO-QUÍMICA DE QUEIJO**  
**TIPO MINAS FRESCAL OBTIDO A PARTIR DO LEITE**  
**CONCENTRADO POR ULTRAFILTRAÇÃO**

**RAUL JACOBSEN NETO**

Engenheiro de Alimentos

Florianópolis, dezembro de 2006.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

**AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA E FÍSICO-QUÍMICA DE QUEIJO**  
**TIPO MINAS FRESCAL OBTIDO A PARTIR DO LEITE**  
**CONCENTRADO POR ULTRAFILTRAÇÃO**

Dissertação submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Cunha Petrus

Co-Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Elane Schwinden Prudêncio

**RAUL JACOBSEN NETO**

Engenheiro de Alimentos

Florianópolis, dezembro de 2006.

“...o conhecimento é a única fonte de vantagem competitiva sustentável a longo prazo...”

Lester Thurow

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sua benção e minha existência.

Aos meus pais pelo seu grande amor e apoio nas minhas escolhas, além dos ensinamentos e dos valores que guiam minha vida.

Ao Prof. José Carlos Cunha Petrus pela orientação e ensinamentos repassados; incentivo, confiança, paciência e compreensão durante o decorrer de todo o trabalho.

À Prof<sup>a</sup>. Elane Schwinden Prudêncio pela co-orientação, incentivo e generosidade; pela disponibilidade de ajuda sempre que necessária e dos conhecimentos repassados para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. João Borges Laurindo por disponibilizar o texturômetro do PROFÍ na realização das análises do perfil de textura.

Ao Prof. Pedro Luiz Manique Barreto pelo auxílio e por disponibilizar o reômetro na realização das análises de viscosidade dos retentados.

Ao aluno de pós-graduação Thiago Meurer Cunha pelo auxílio e acompanhamento das análises realizadas no reômetro.

À aluna de pós-graduação Isabelle Damian Prudêncio pela ajuda fornecida no LABSEM durante as primeiras ultrafiltrações do leite.

A todos os professores do EQA que contribuíram com seus conhecimentos e auxílio.

Aos colegas de classe pelo apoio, ajuda e cumplicidade.

## **SUMÁRIO**

<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>vii</b>
<b>RESUMO</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>ix</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>12</b>
<b>2.1 LEITE</b>	<b>12</b>
<b>2.2 QUEIJO MINAS FRESCAL</b>	<b>14</b>
<b>2.3 TECNOLOGIA DE SEPARAÇÃO COM MEMBRANAS</b>	<b>16</b>
<b>2.3.1 Membranas</b>	<b>20</b>
<b>2.3.2 A ultrafiltração na indústria de laticínios</b>	<b>23</b>
<b>2.4 REOLOGIA</b>	<b>24</b>
<b>2.4.1 Fundamentos de reologia</b>	<b>26</b>
<b>2.4.2 Viscoelasticidade e modelos viscoelásticos</b>	<b>27</b>
<b>2.4.3 Teste de relaxação</b>	<b>29</b>
<b>2.4.1 Análise instrumental do perfil de textura</b>	<b>32</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>34</b>
<b>3.1 MATERIAL</b>	<b>34</b>
<b>3.2 ULTRAFILTRAÇÃO (UF)</b>	<b>34</b>
<b>3.2.1 Cálculo do fator de redução volumétrica (FRV)</b>	<b>36</b>
<b>3.2.2 Cálculo do fluxo de permeado (J)</b>	<b>36</b>
<b>3.3 PREPARAÇÃO DOS QUEIJOS TIPO MINAS FRESCAL</b>	<b>37</b>
<b>3.4 ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA</b>	<b>38</b>
<b>3.5 RENDIMENTO</b>	<b>38</b>

<b>3.6</b>	<b>MEDIDAS DAS PROPRIEDADES DE FLUXO</b>	<b>39</b>
<b>3.6.1</b>	<b>Teste de relaxação</b>	<b>39</b>
<b>3.6.1.1</b>	<b>Ajuste da função exponencial</b>	<b>39</b>
<b>3.6.1.2</b>	<b>Linearização das curvas de relaxação através do modelo de peleg</b>	<b>41</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Análise instrumental do perfil de textura (TPA)</b>	<b>41</b>
<b>3.7</b>	<b>ANÁLISE ESTATÍSTICA</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>ULTRAFILTRAÇÃO DO LEITE</b>	<b>42</b>
<b>4.2</b>	<b>ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA</b>	<b>43</b>
<b>4.3</b>	<b>RENDIMENTO</b>	<b>44</b>
<b>4.4</b>	<b>MEDIDAS DA VISCOSIDADE DOS RETENTADOS</b>	<b>45</b>
<b>4.5</b>	<b>REOLOGIA DOS QUEIJOS</b>	<b>50</b>
<b>4.6</b>	<b>ANÁLISE INSTRUMENTAL DO PERFIL DE TEXTURA (TPA)</b>	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>54</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>55</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1. Composição centesimal média do leite de vaca.</b>	<b>12</b>
<b>Tabela 2. Força motriz promotora dos principais processos de separação com membranas.</b>	<b>17</b>
<b>Tabela 3. Principais aplicações da filtração com membranas nas indústrias de alimentos.</b>	<b>19</b>
<b>Tabela 4. Propriedades de alguns materiais utilizados na preparação de membranas.</b>	<b>21</b>
<b>Tabela 5. Configurações de membranas e materiais utilizados em sua preparação</b>	<b>21</b>
<b>Tabela 6. Composição média percentual dos queijos fabricados a partir dos retentados.</b>	<b>43</b>
<b>Tabela 7. Rendimento médio dos queijos fabricados a partir dos retentados de FRV 2,5, 3, 3,5 e 4.</b>	<b>44</b>
<b>Tabela 8. Viscosidade aparente dos retentados nas temperaturas de 5, 10, 37 e 45°C.</b>	<b>45</b>
<b>Tabela 9. Índice de comportamento do fluxo dos retentados nas temperaturas de 5, 10, 37 e 45°C.</b>	<b>46</b>
<b>Tabela 10. Energias de ativação dos retentados em função dos diferentes FRV e temperatura da medida da viscosidade.</b>	<b>49</b>
<b>Tabela 11. Valores dos parâmetros obtidos pela regressão não-linear utilizados para calcular os módulos de elasticidade e viscosidades do modelo generalizado de Maxwell.</b>	<b>50</b>
<b>Tabela 12. Valores dos módulos de elasticidade e viscosidade do modelo generalizado de Maxwell.</b>	<b>51</b>
<b>Tabela 13. Valores dos parâmetros do modelo linear de Peleg.</b>	<b>52</b>
<b>Tabela 14. Parâmetros da análise instrumental do perfil de textura dos queijos fabricados a partir dos retentados de FRV 2,5, 3, 3,5 e 4.</b>	<b>53</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1. Produção, em toneladas, dos principais queijos no Brasil.</b>	<b>15</b>
<b>Figura 2. Capacidade de separação das membranas de microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa.</b>	<b>18</b>
<b>Figura 3. Fenômeno de polarização por concentração e colmatagem de uma membrana filtrante.</b>	<b>22</b>
<b>Figura 4. Natureza da colmatagem conforme relação do diâmetro da partícula (<math>d</math>) e diâmetro do poro (<math>d_p</math>) da membrana.</b>	<b>23</b>
<b>Figura 5. Resposta de um corpo de Maxwell à aplicação de uma tensão constante. (a) representação física de um corpo de Maxwell. (b) aplicação da tensão – o elemento elástico sofre uma deformação finita e instantânea. (c) manutenção da tensão – o elemento viscoso inicia a fluir e o elemento elástico permanece com a mesma deformação inicial.</b>	<b>29</b>
<b>Figura 6. Representação física do modelo generalizado de Maxwell.</b>	<b>31</b>
<b>Figura 7. Representação gráfica da análise instrumental do perfil de textura.</b>	<b>32</b>
<b>Figura 8. Esquema simplificado da unidade piloto de ultrafiltração utilizada nos experimentos.</b>	<b>35</b>
<b>Figura 9. Membrana orgânica de polissulfona de configuração espiral (Romicon®) utilizada nos experimentos.</b>	<b>35</b>
<b>Figura 10. Fluxograma da preparação dos queijos tipo Minas Frescal a partir dos retentados em diferentes FRV.</b>	<b>37</b>
<b>Figura 11. Comportamento do fluxo do permeado (<math>J</math>) médio durante a concentração do leite em função do FRV.</b>	<b>42</b>
<b>Figura 12. Relação entre a taxa de deformação/tensão de cisalhamento (curvas de fluxo) para os retentados obtidos nos diferentes FRV a 5°C, durante um ciclo ascendente de tensão de cisalhamento entre 24,46 e 262,95 s<sup>-1</sup>.</b>	<b>47</b>
<b>Figura 13. Relação entre a taxa de deformação/tensão de cisalhamento (curvas de fluxo) para os retentados obtidos nos diferentes FRV a 10°C, durante um ciclo ascendente de tensão de cisalhamento entre 24,46 e 262,95 s<sup>-1</sup>.</b>	<b>47</b>
<b>Figura 14. Relação entre a taxa de deformação/tensão de cisalhamento (curvas de fluxo) para os retentados obtidos nos diferentes FRV a 37°C, durante um ciclo ascendente de tensão de cisalhamento entre 24,46 e 262,95 s<sup>-1</sup>.</b>	<b>48</b>
<b>Figura 15. Relação entre a taxa de deformação/tensão de cisalhamento (curvas de fluxo) para os retentados obtidos nos diferentes FRV a 45°C, durante um ciclo ascendente de tensão de cisalhamento entre 24,46 e 262,95 s<sup>-1</sup>.</b>	<b>48</b>
<b>Figura 16. Efeito da temperatura na viscosidade dos retentados a diferentes FRV.</b>	<b>50</b>



## RESUMO

O mercado mundial de queijos vem crescendo a cada ano e novas tecnologias vêm sendo incorporadas ao seu processamento visando à obtenção de um produto de melhor qualidade e melhor preço.

A tecnologia de membranas vem sendo utilizada na concentração do leite e do soro. No primeiro caso, para produção de queijo e, no segundo, para incorporação do concentrado em produtos como iogurte, sorvetes e bebidas lácteas. Estes produtos têm sido bem aceitos pelo consumidor e o mercado vem crescendo a cada ano.

Este estudo teve como objetivo a fabricação do queijo Minas Frescal, a partir do leite concentrado por ultrafiltração, utilizando-se Fatores de Redução Volumétrica (FRV), variando de 2,5 a 4,0. Os produtos foram avaliados quanto às suas características físico-químicas, rendimento e análise instrumental do perfil de textura. Foram avaliadas, também, as propriedades reológicas dos retentados de leite obtidos por ultrafiltração.

Observou-se que, durante a concentração do leite por ultrafiltração, o fluxo permeado médio decresceu linearmente com o aumento do FRV. A partir dos concentrados, indiferente dos FRV utilizados, foi possível a fabricação de queijos tipo Minas Frescal coagulados diretamente na embalagem. Queijos fabricados com diferentes FRV apresentaram rendimento e características físico-químicas distintas.

As medidas das propriedades de fluxo realizadas com os retentados mostraram que estes apresentaram comportamento Newtoniano. Nos concentrados observou-se boa correlação dos valores de energia de ativação encontrados com a relação de Arrhenius, verificando-se um aumento significativo destes valores com o aumento do FRV. Houve também boa correlação das curvas obtidas experimentalmente com o modelo generalizado de Maxwell com  $n=2$ .

## **TECHNOLOGICAL AND PHYSICO-CHEMICAL EVALUATION OF MINAS FRESCAL-TYPE CHEESE PRODUCE FROM MILK CONCENTRATED BY ULTRAFILTRATION**

### **ABSTRACT**

The world cheese market is growing steadily and new technologies have been incorporated in its processing with a view to obtaining a higher quality product at a better price.

The membrane technology has been employed in the concentration of milk and whey. In the first case, for the production of cheese, and in the second, for incorporation of the concentrate in products such as yoghurt, ice creams and milk-based drinks. These products have been accepted by consumers and the market has grown year on year.

The objective of this study was the production of Minas Frescal-type cheese from milk concentrated by ultrafiltration, using Volumetric Reductions Factors (VRF) varying from 2.5 to 4.0. The products were evaluated with regard to their physico-chemical characteristics, yield and instrumental analysis of texture profile. The rheological properties of the milk solids obtained by ultrafiltration also were examined.

It was found that during concentration of the milk by ultrafiltration, the average permeate flux declined linearly, with the increased of VRF. Regardless of the VRF used, it was possible to produce Minas Frescal-type cheese coagulates, from concentrates, in the packaging itself. Cheese produced with different VRF presented a distinct yield and physico-chemical characteristics.

Measurement of the flow properties of the solids showed that these presented Newtonian behavior. In the concentrates a good correlation was found between the observed values for activation energy and the Arrhenius relationship, confirming a significant increase in the values with increased VRF. There was also good correlation between the curves obtained experimentally and Maxwell's generalized model with  $n = 2$ .

## 1 INTRODUÇÃO

Além de oferecer uma grande variedade de sabores e texturas, o queijo é um alimento altamente nutritivo, conveniente e versátil. Calcula-se que um terço da produção mundial de leite seja utilizada na fabricação de queijos, o que representa 30% das vendas totais de produtos lácteos no mundo, sendo previsto um aumento de 9,8% até 2007. Este acréscimo, em maior parte, é consequência do uso de embalagens adequadas, aumento das aplicações do queijo no setor de serviços alimentícios e o surgimento de especialidades e queijos de identidade físico-química própria (Farkye, 2004).

A fabricação industrial de queijos no Brasil teve início a partir da década de 20 com o estabelecimento de imigrantes dinamarqueses no sul de Minas Gerais e holandeses na região de Santos Dumont e Barbacena (Furtado, 1991). A elaboração de queijos constitui uma das mais importantes atividades da indústria de laticínios onde um dos tipos de maior produção e consumo é o queijo Minas Frescal, cuja produção se concentra principalmente em indústrias de pequeno e médio porte das regiões Sul e Sudeste do Brasil (Pinto et al., 1996). Isso se deve, em parte, ao maior rendimento obtido na elaboração deste tipo de queijo, ao processamento simples que requer e à ausência de maturação do produto final, o que possibilita um retorno rápido do investimento e, conseqüentemente, custos menores aos consumidores (Felício Filho, 1984; Behmer, 1991; Pinto et al., 1996). Entre os anos de 2000 e 2005, observou-se um aumento de 15,8 % na produção deste tipo de queijo que passou de 25.900 toneladas para 30.000 toneladas (ABIQ, 2006).

Nas últimas décadas, a fabricação do queijo Minas Frescal sofreu modificações, visando melhorar a qualidade do produto, aumentar o rendimento na fabricação e a vida-de-prateleira, buscando-se ainda a padronização e a segurança microbiológica (Campos, 2000).

O queijo Minas Frescal é produzido industrialmente pelo processo tradicional, com adição de cultura ou fermento láctico; a acidificação direta, com adição de ácido láctico ou através da ultrafiltração, utilizando-se o método do pré-queijo líquido denominado MMV, desenvolvido por Maubois, Mocquot e Vassal (Maubois e Mocquot, 1975). Este método vem sendo aplicado com sucesso para produzir o queijo Minas Frescal por meio da coagulação direta do pré-queijo

líquido, através da adição de coalho em sua embalagem comercial final. Embora tenha boa aceitabilidade no mercado, este tipo de queijo apresenta uma textura diferente do produto tradicional (Mortensen, 1992; Lucey, 2004; Carvalho et al., 2007).

Os queijos, como outros produtos alimentícios, possuem propriedades reológicas que são importantes para a sua qualidade e aceitação pelo consumidor, tais como a firmeza e textura. Tais propriedades estão relacionadas diretamente com a composição e microestrutura do produto, assim como o estado físico-químico destes componentes, força de interação entre os elementos estruturais e a macroestrutura (Fox et al., 2000; Foegeding et al., 2003).

Algumas análises em queijos, como por exemplo, a determinação do perfil de textura, utilizando a compressão uniaxial, tem como principal objetivo, determinar as propriedades mecânicas e de fratura. Estas propriedades podem ser correlacionadas com parâmetros sensoriais, tais como, elasticidade e firmeza. Além disso, testes de viscoelasticidade (relaxação), na faixa linear (pequenas deformações), fornecem informações importantes em nível molecular (Shoemaker, 1992; Vélez-Ruiz e Barbosa-Cánovas, 1997; Fox et al., 2000; Bourne, 2002). Estes testes são utilizados também com o objetivo de se estabelecer padrões de qualidade que garantirão a uniformidade dos produtos em todos os processamentos.

Este estudo teve como objetivo a fabricação do queijo Minas Frescal, a partir do leite concentrado por ultrafiltração, utilizando-se diferentes Fatores de Redução Volumétrica (FRV). Os produtos foram avaliados quanto às suas características físico-químicas, rendimento e análise instrumental do perfil de textura. Foram avaliadas, também, as propriedades reológicas dos retentados de leite obtidos por ultrafiltração.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 LEITE

O leite é um alimento constituído principalmente por proteínas, lipídios, lactose, sais minerais, enzimas, vitaminas lipossolúveis e hidrossolúveis (Tabela 1) (Borszcz, 2002; Smit, 2003). Do ponto de vista biológico, o leite é o produto da secreção das glândulas mamárias de fêmeas mamíferas. Do ponto de vista físico-químico, o leite é uma mistura homogênea de grande número de substâncias (lactose, glicerídios, proteínas, sais, vitaminas, enzimas, entre outros), das quais algumas estão em emulsão (a gordura e as substâncias associadas), algumas em suspensão (as caseínas associadas aos sais minerais) e outras em dissolução verdadeira (lactose, vitaminas hidrossolúveis, proteínas do soro, sais, entre outros) (Ordóñez et al., 2005). Porém, a composição química do leite, pode apresentar quantidade e qualidade de componentes variáveis e dependentes de fatores como espécie (Fennema, 2000), raça, alimentação do animal, idade, número de parições, tempo de lactação, variações climáticas (Behmer, 1998; Fennema, 2000), estado sanitário, individualidade (Fennema, 2000), entre outros.

**Tabela 1.** Composição centesimal média do leite de vaca.

Constituinte	Teor % (m/m)	Varição % (m/m)
Água	87,3	85,50 – 88,70
Lactose	4,60	3,80 – 5,30
Gordura	3,90	2,40 – 5,50
Proteínas	3,25	2,30 – 4,40
Minerais	0,65	0,53 – 0,80
Ácidos orgânicos	0,18	0,13 – 0,22
Outros	0,14	-

Fonte: Adaptado de Walstra e Jenness (1984).

Em volume, a água é o mais abundante componente do leite, sendo responsável pelos valores da densidade e pelo crescimento de microrganismos quando não obtido, armazenado e/ou transportado adequadamente (Behmer, 1998).

As proteínas do leite são os principais componentes do leite devido ao seu valor nutritivo, pois além de fornecer nitrogênio e aminoácidos essenciais para o organismo humano, possuem atividades fisiológicas importantes devido às seqüências bioativas (Bauman et al., 2006). As principais proteínas do leite são as caseínas e as proteínas do soro ( $\beta$ -lactoglobulina,  $\alpha$ -lactoalbumina, soroalbumina bovina, imunoglobulinas, entre outras) (Anema; Lee; Klostermeyer, 2006). Os cinco tipos de caseínas ( $\alpha$ 1-,  $\alpha$ 2-,  $\beta$ -,  $\kappa$ - e  $\gamma$ -caseína) representam cerca de 76 % das proteínas do leite (Thomã-Worringer; Sorensen; López-Fandiño, 2006), sendo o restante constituído principalmente pela  $\beta$ -lactoglobulina e  $\alpha$ -lactoalbumina, perfazendo desta forma aproximadamente 9,5 % e 3,5 % do total das proteínas lácteas, respectivamente. Outras proteínas, como, por exemplo, as enzimas, as imunoglobulinas e os hormônios são encontrados em menores teores. Tanto a  $\beta$ -lactoglobulina como a  $\alpha$ -lactoalbumina, com massas molares de 18 kDa e 16 kDa, respectivamente (Chatterton et al., 2006), são consideradas excelentes sob o ponto de vista nutricional devido ao elevado teor de aminoácidos essenciais, como por exemplo, lisina, metionina e triptofano (Anema; Lee; Klostermeyer, 2006).

Os lipídios do leite são considerados complexos e contêm principalmente lipídios apolares (98%), representados por glicerídios (triglicerídios, diglicerídios e monoglicerídios) e ácidos graxos livres (Varnam; Sutherland, 1994); e lipídios polares (1,5%) (Rombaut; Dewettinck, 2006).

A lactose é o mais simples e o mais constante açúcar em proporção no leite, além da glicose e galactose. O leite contém entre 45 e 50 g/litro de lactose (Ordóñez et al., 2005; Fenaille et al., 2006).

De acordo com Ordóñez et al. (2005) sais englobam compostos não ionizáveis e os que se encontram no leite podem estar na forma de íons de baixa massa molar. Portanto, a referência não é apenas relativa a sais minerais ou inorgânicos, mas incluem-se também alguns compostos

orgânicos. Os componentes majoritários são fosfatos, citratos, cloretos, sulfatos, carbonatos e bicarbonatos de sódio, potássio, cálcio e magnésio. Os componentes minoritários são representados por cobre, ferro, boro, manganês, zinco, iodo, entre outros (Ordóñez et al., 2005).

As enzimas do leite, apesar de serem encontradas em baixas concentrações, são representadas principalmente pelas lipases, proteases, fosfatases, oxidases, lactoperoxidases, xantina oxidase, catalase, superóxido dismutase, sulfidroxilase e transferases (Ordóñez et al., 2005). De maneira geral, a presença dessas enzimas pode levar à hidrólise de alguns componentes, serem empregadas para controlar o tratamento térmico, ou ainda indicativas de contaminação microbiológica (Spreer, 1991).

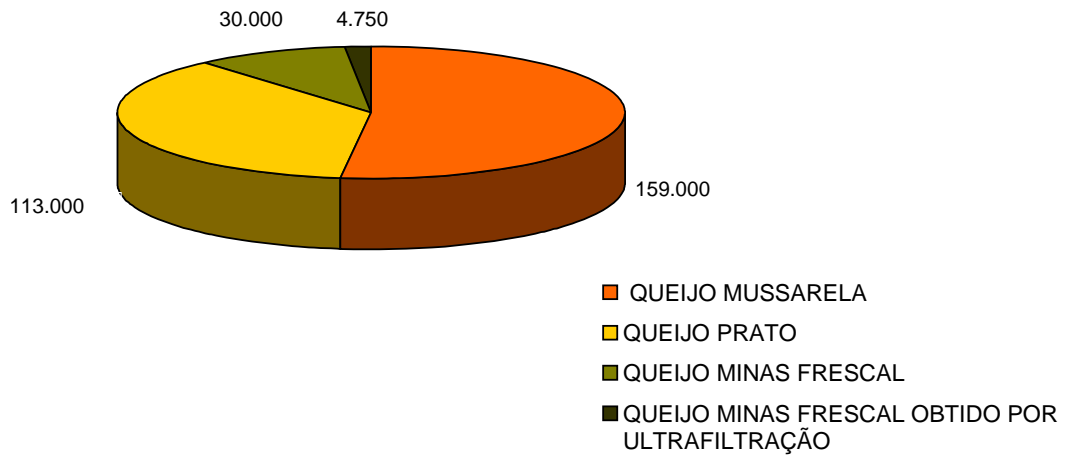
No leite, as vitaminas lipossolúveis (A, D e E) estão associadas aos triglicerídios e, portanto, estão em menores concentrações no leite desnatado ou semi-desnatado. As vitaminas hidrossolúveis podem ser isoladas a partir do soro de queijo e, por isso, seu conteúdo é reduzido nos queijos elaborados pelo processo tradicional, devido à dessoragem. O leite contém, ainda, riboflavina (vitamina B<sub>2</sub>), vitamina B<sub>12</sub>, tiamina (vitamina B<sub>1</sub>), vitamina A e vitamina C, cujos teores variam em função do tratamento térmico aplicado ao produto (Ordóñez et al., 2005; Fenaille et al., 2006).

As excelentes propriedades nutricionais do leite, levando a importantes benefícios à saúde e o aumento da produção, são considerados fatores determinantes na escolha deste tipo de matéria-prima na produção de derivados de grande aceitabilidade. Desta forma, novas tecnologias são incentivadas a fim de transformar o leite em derivados cada vez mais nobres (Maijala, 2000).

## **2.2 QUEIJO MINAS FRESCAL**

O queijo Minas Frescal é um queijo tipicamente brasileiro, originário do Estado de Minas Gerais, onde era produzido inicialmente de forma caseira (Oliveira, 1986). Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Queijo, o queijo Minas Frescal ocupa a terceira posição entre os queijos

produzidos no Brasil, sendo inferior apenas aos queijos tipo Mussarela e Prato (Figura 1) (ABIQ, 2006).



**Figura 1.** Produção, em toneladas, dos principais queijos no Brasil.

Fonte: ABIQ (2006).

A Portaria nº 352, de 04 de setembro de 1997 e a Instrução Normativa nº 4, de 01 de março de 2004, definem o queijo Minas Frescal como um queijo fresco obtido por coagulação enzimática do leite com coalho e/ou outras enzimas coagulantes apropriadas, complementada ou não com ação de bactérias lácticas específicas (BRASIL, 1997; BRASIL, 2002). Este queijo pode ser classificado também como um queijo semi-gordo, de alta umidade, a ser consumido fresco, com coloração esbranquiçada, textura fechada ou aberta, com poucas olhaduras mecânicas, consistência mole e sabor de suave a ligeiramente ácido. O rendimento na fabricação deste queijo varia entre 5 e 7 litros de leite por quilo de queijo (AGRIDATA, 2006), enquanto os teores de umidade, gordura e sal variam entre 46 a 60 %, 15 a 19 % e 1,4 a 1,6 %, respectivamente (Silva et al., 2005; AGRIDATA, 2006). Queijos frescos, brancos e leves são muito perecíveis mesmo sob refrigeração e, por isso, apresentam uma menor vida-de-prateleira, em média 15 dias (Furtado e Lourenço Neto, 1994; Peresi et al. 2001; Silva et al., 2003).



De maneira geral, o processamento do queijo Minas Frescal tradicional é constituído das seguintes etapas: pasteurização do leite, coagulação, corte, dessoragem, enformagem, salga, embalagem e refrigeração (Vieira e Neto, 1982).

Geralmente, a indústria brasileira emprega, na produção do queijo Minas Frescal, o processo de acidificação direta pela adição de ácido láctico, em substituição ao fermento láctico. O emprego do ácido láctico apresenta maiores vantagens do ponto de vista técnico e econômico, basicamente por ser mais fácil a aplicação. Além disto, proporciona maior rendimento, maior umidade, maior pH final e menor acidez (Furtado et al., 1980a; Furtado et al., 1980b).

A ultrafiltração é outra tecnologia que pode ser empregada na fabricação de queijos Minas Frescal. Esta tecnologia é baseada no método MMV, onde o queijo é obtido por meio da adição de coalho diretamente na embalagem comercial final, eliminando as etapas de corte da massa e dessoragem. Consideravelmente, menos coalho é requerido porque o processo de ultrafiltração aumenta o rendimento a partir da concentração da gordura e proteínas (lactoalbumina e lactoglobulina são concentradas juntamente com a caseína). O queijo produzido a partir deste método é realizado em sistema fechado e, assim, pode-se reduzir a contaminação microbiológica via manipulação manual (Kosikowski, 1986; Van Dender, 1995; Hinrichs, 2001; Carvalho et al., 2007).

### **2.3 TECNOLOGIA DE SEPARAÇÃO COM MEMBRANAS**

A filtração por membranas é definida como a separação de um ou mais componentes de um fluido através de uma membrana com permeabilidade seletiva (Cheryan, 1986).

Na filtração tangencial, o processo é contínuo e de maior eficiência quando comparada com a filtração convencional, pois o fluido escoia paralelamente à superfície da membrana, possibilitando que a maior parte dos solutos depositados na membrana sejam arrastados continuamente com a corrente de alimentação. Do processo, resultam dois líquidos de composições distintas, o permeado e o retentado. O permeado ou filtrado atravessa a membrana,

enquanto o retentado contém os solutos ou sólidos suspensos que não permeiam a membrana (Sondhi et al., 2003). O transporte de moléculas através da membrana pode ser realizado por convecção ou difusão, induzido por uma força motriz, ou seja, um campo eletromagnético ou gradiente de concentração, pressão ou temperatura, conforme mostrado na Tabela 2 (Srikanth, 1999).

**Tabela 2.** Força motriz promotora dos principais processos de separação com membranas.

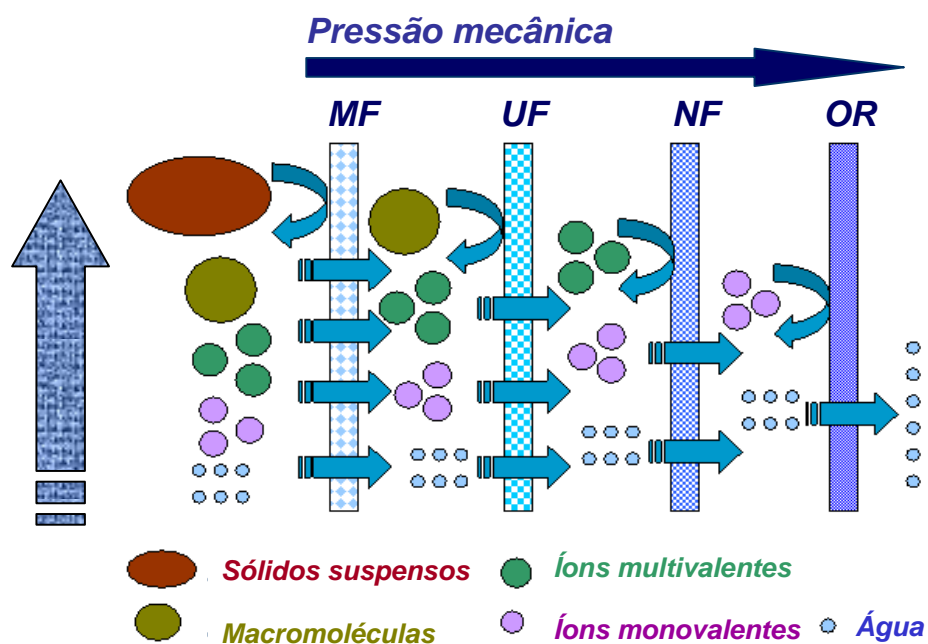
Força motriz	Processo de separação por membranas
Diferença de pressão	microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa
Diferença de potencial químico	pervaporação, diálise, separação de gases e permeação de vapor
Diferença de potencial elétrico	eletrodiálise
Diferença de temperatura	destilação por membrana

Fonte: Srikanth (1999).

Os processos de separação com membranas podem ser caracterizados em termos do fluxo permeado, retenção de solutos pela membrana, rendimento e posição (condição) das correntes de alimentação. A osmose reversa (OR), nanofiltração (NF), ultrafiltração (UF) e microfiltração (MF) são os tipos mais comuns de processos que utilizam membranas filtrantes. Seus parâmetros de processamento são determinados pela pressão, reciclo na taxa de alimentação e temperatura (Srikanth, 1999; Atrá et al., 2005). A Figura 2 ilustra os processos de separação com membranas de acordo com o tamanho de partícula retida ou permeada pelas membranas (Kock - Membrane System, 2004).

Os custos e o desempenho de cada um dos processos com membranas estão relacionados com a natureza da membrana, fluxo permeado, eficiência na separação e na complexidade e

automação do equipamento. Os parâmetros de processamento e propriedades do fluido têm influência sobre o fluxo e a concentração dos componentes do retentado e permeado. Portanto, ao desenvolver um projeto específico ou novo processo de separação, os dados de fluxo permeado, retenção e natureza físico-química do soluto e quantidade a ser processada, serão necessários para a escolha, dimensionamento e implantação do processo (Ravazi et al., 2003).



**Figura 2.** Capacidade de separação das membranas de microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa.

Fonte: Adaptado de Koch Membrane Systems (2004).

As principais vantagens da filtração tangencial para as indústrias de alimentos são: a simplificação dos fluxogramas de processo (substituição de duas ou mais etapas da produção); melhora no desempenho do processo (clarificação); melhor qualidade do alimento (uso de baixas temperaturas); qualidade na separação ou fracionamento; tecnologia considerada limpa; desenvolvimento de novos produtos (queijos) (Tabela 3); instalações compactas e, na maioria dos casos, menor consumo de energia (Daufin et al., 2001).

**Tabela 3.** Principais aplicações da filtração com membranas nas indústrias de alimentos.

Processo	Aplicação	Exemplo	Características do módulo da membrana				
			Tipo	Material	Cut-off <sup>2</sup>	J (dm <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	r (%) <sup>3</sup>
MF	Fracionamento	Bactérias, fermento e recuperação de leveduras a partir de meios de cultura ou bebidas	T,PF	C,CA,PA,PP	0,1-1,5 µm	150-900	>99
	Clarificação	Meio de fermentação antes e depois da quebra das células	T	C	0,1-0,2 µm	50-500	>99
		Sucos a partir de açúcar de cana e beterraba	T,SW	C,PS,PES	0,1-5 µm	20-200	>99
	Concentração	Culturas iniciadoras	T,PF,HF	C,CA,PES	0,1-0,2 µm	30-200	>99
Polissacarídeos de alto peso molecular (dextranas)		T,HF	C,PS	10-500 kDa	30-100	>99	
UF	Fracionamento	Leite e soro de leite (proteína da lactose e minerais)	PF,SW,T	C,PS,PES	10-100 kDa	5-100	70-97
		Frações de óleos a partir de emulsões óleo/água	SW	TFC	8 kDa	10-13	70-90
	Clarificação	Sucos e bebidas alcoólicas	Hf,SW,T	PAN,PS,PES	10-100 kDa	5-100	70-97
		Remoção de colóides, pigmentos e compostos de baixo peso molecular	Hf	PAN,PES	10-50 kDa	5-50	70-83
	Concentração	Albumina e proteínas	SW	C,PS,PES	10-100 kDa	5-30	70-83
		Polissacarídeos (carragena, xantana)	SW	PS	500 kDa	5-10	-
NF/OI	Tratamento de H <sub>2</sub> O	Pré-tratamento de água para caldeiras	SW	CA,PES		5-25	60-95 <sup>1</sup>
	Concentração	Sucos (tomate, laranja, maçã, uva)	SW	PA,PES		5-30	60-95 <sup>1</sup>
		Leite e soro de leite	SW	PS		5-25	60-95 <sup>1</sup>
	Fracionamento	Pigmentos	SW	PA,PES		10-50	60-95 <sup>1</sup>
		Antibióticos ou ácidos orgânicos a partir de meios de cultura	SW	PS		10-70	60-95 <sup>1</sup>
		Desmineralização do soro de leite	SW	PA,PES		20-50	30-60 <sup>1</sup>
		Remoção de etanol de vinho ou cerveja	SW	PA,PES		50-100	30-60 <sup>1</sup>
		Recuperação de ácidos e açúcares de águas residuais	SW	PS,PA,PES		5-30	60-95 <sup>1</sup>

T: Tubular; PF: Placas; SW: Espiral; HF: Fibras; C: Cerâmica; CA: Acetato de celulose; PA: Poliamida; PP: Polipropileno; PS: Polissulfona; PES: Polietersulfona; PAN: Poliacrilonitrila; TFC: Composite de filmes finos.

<sup>1</sup> (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

<sup>2</sup>Cut-off ou ponto de corte: massa molar do soluto que é 90% rejeitado, em condições padrões, pela membrana. <sup>2</sup>J: Fluxo volumétrico de permeado. <sup>3</sup>r: rejeição do soluto

Fonte: Adaptado de Moresi e Lo Presti (2003).

### 2.3.1 MEMBRANAS

Tipicamente, a membrana é uma barreira que separa duas fases e restringe o transporte de vários componentes químicos de maneira seletiva. Existem membranas homogêneas ou heterogêneas, de estruturas simétricas ou assimétricas, sólidas ou líquidas, carregadas positiva ou negativamente, neutras ou bipolares (Srikanth, 1999).

Comercialmente, as membranas sintéticas são produzidas a partir de uma grande variedade de materiais, geralmente polímeros (material orgânico) e metais ou materiais cerâmicos (material inorgânico). Tais materiais podem ser classificados em quatro gerações de acordo com o seu desenvolvimento (Gibson, 1986).

A primeira geração de membranas foi desenvolvida a partir de celulose e apresentava durabilidade limitada. Estas membranas, normalmente produzidas a partir de acetato de celulose possuem certas limitações, tais como o uso de temperaturas até o limite de 65°C, pH 2 a 8, além de possuírem baixa resistência ao cloro e à ação de microrganismos (Paulson et al., 1984; Cheryan, 1986). A segunda geração de membranas, elaboradas a partir de polímeros sintéticos como poliamida (PA), polissulfona (PS), poliarilssulfona (PAS), polifluoreto de vinilideno (PVDF), polipropileno (PP), ésteres de celulose, polivinilclorida (PVC), politetrafluoretileno, (PTFE), poliacrilonitrila (PAN), náilon e policarbonato (PC), apresentam uma resistência superior em relação àquelas de celulose. A terceira geração de membranas, geralmente de alto valor comercial, devido ao uso de materiais inorgânicos (cerâmica de zircônio e alumina) são facilmente esterilizáveis e podem ser utilizadas em ampla faixa de pH (1 a 13), podendo ser submetidas às condições severas de limpeza, por serem quimicamente inertes (Feuerpeil, 1993). Finalmente, as membranas de quarta geração são fabricadas a partir de fibra de carbono (Girard e Fukumoto, 2000). Todas estas membranas, preparadas com materiais distintos (Tabela 4 e 5) podem apresentar diferentes configurações (Tabela 5) (Adaptado de Cheryan (1986) apud Girard e Fukumoto, 2000; GEA FILTRATION, 2005).

**Tabela 4.** Propriedades de alguns materiais utilizados na preparação de membranas.

Material <sup>1</sup>	Temperatura de uso máxima °C	Faixa de pH	Resistência aos solventes
Acetato de celulose	30/65	2,0 – 7,25	Baixa
Flúorpolímero	60	1,5 – 12,00	Alta
Poliacrilonitrila	60	2,0 – 10,00	Alta
Poliamida	60	1,5 – 9,50	Média
Poliétersulfona	80	1,5 – 12,00	Média
Polisulfona	80	1,5 – 12,00	Média
PVDF	80	1,5 – 12,00	Alta
Óxido de alumina <sup>2</sup>	300	0 – 14,00	Alta
Óxido de zircônia <sup>2</sup>	300	0,5 – 13,50	Alta

Fonte: Adaptado de Cheryan (1986) apud Girard e Fukumoto (2000).

<sup>1</sup> A pressão de uso depende da aplicação da membrana (OR, NF, UF ou MF)

<sup>2</sup> Pouco resistente ao ácido fosfórico.

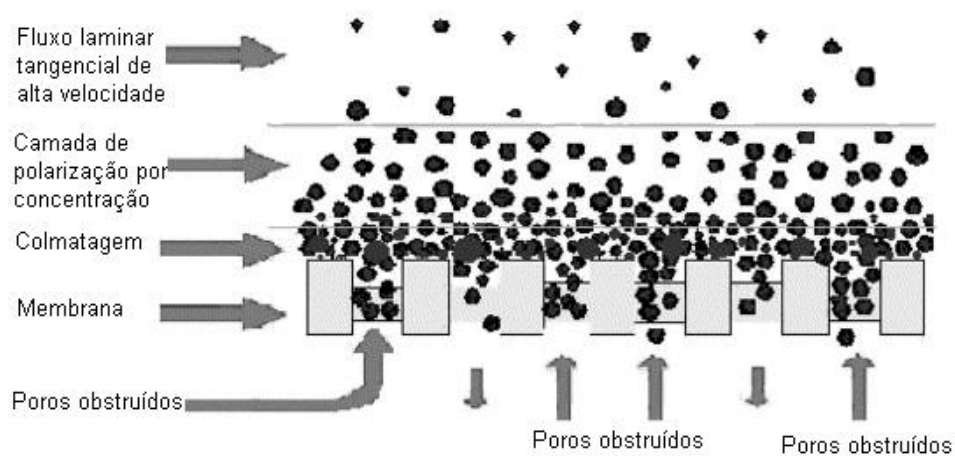
**Tabela 5.** Configurações de membranas e materiais utilizados em sua preparação

Configuração	Material	Características / Vantagens
Espiral	orgânico	construção compacta e grande área de filtração / baixo investimento e custo de energia
Tubular	orgânico	boa resistência a entupimentos / fluxo de alimentação pode apresentar grandes quantidades de sólidos em suspensão ou componentes fibrosos
Fibra-oca	orgânico	pacote de densidade alta e canal aberto / permite lavagem contra-fluxo (a partir do lado do permeado)
Cerâmica	inorgânico	aplicações sanitárias e em produtos de alto valor agregado / apresenta resistência a pHs extremos, temperatura ou solventes
Aço inox	inorgânico	robustez / alta resistência em condições agressivas (permite alta viscosidade do fluido de alimentação)

Fonte: GEA FILTRATION (2005).

Mesmo utilizando-se fluxo tangencial, observa-se no decorrer do processo de separação e/ou concentração por membranas, certa deposição de solutos na superfície da membrana,

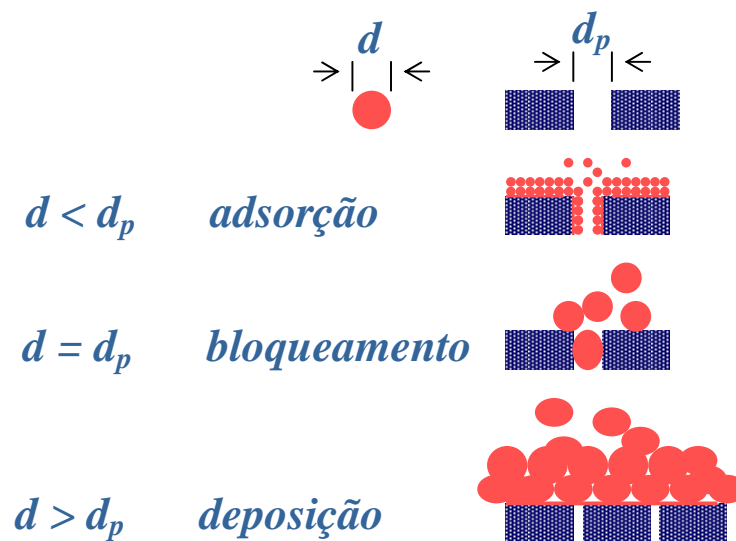
obstruindo total ou parcialmente seus poros. Como resultado, ocorre uma redução de fluxo permeado que, juntamente com o nível de retenção desejado, é um dos principais parâmetros de avaliação do desempenho do processo. Este problema é frequentemente relacionado aos fenômenos de polarização por concentração, levando à colmatagem, ou seja, o entupimento ou bloqueio dos poros da membrana, conforme esquematizado na Figura 3 (Hanhui et al, 2004).



**Figura 3.** Fenômeno de polarização por concentração e colmatagem de uma membrana filtrante.  
Fonte: Hanhui et al.(2004).

A polarização por concentração é predominantemente uma função hidrodinâmica da membrana. Ela é causada pela formação de um gradiente de concentração decorrente dos componentes retidos próximos ou na superfície da membrana e dependentes das interações entre a pressão, viscosidade, velocidade tangencial, condições de escoamento e temperatura de processo. Inversamente, a colmatagem é um fenômeno irreversível que afeta o processo de separação nas formas de deposição, adsorção ou bloqueamento dos poros da membrana pelas partículas (Figura 4). A colmatagem somente é eliminada durante o procedimento de limpeza da membrana que é realizada após cada ciclo de processamento. A consolidação da colmatagem

pode ser evitada através da operação adequada da planta de processo, operando-se abaixo do fluxo permeado crítico e o estabelecimento de programas de limpeza bem elaborados e eficientes. (Nwuha, 1996; Cheryan, 1998; Chan e Chen, 2004; Cheng e Lin, 2004; Goosen et al., 2004; Brans et al., 2004; Muthukumar, 2005; Bégoïn et al., 2006).



**Figura 4.** Natureza da colmatagem conforme relação do diâmetro da partícula ( $d$ ) e diâmetro do poro ( $d_p$ ) da membrana.

Fonte: Autor

### 2.3.2 A ULTRAFILTRAÇÃO NA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS

A ultrafiltração foi implantada na indústria láctea na década de 70, na Nova Zelândia, para a concentração de soro de leite (De Boer e Hiddink, 1980). Desde então, vem sendo largamente utilizada na indústria de laticínios em diversas aplicações como, por exemplo, na produção de queijos, a partir do retentado do leite, no fracionamento das proteínas do leite, na concentração das proteínas do soro e na padronização do teor de proteínas no leite (Maubois, 1991; Brans et al., 2004).



Em 1983, a ultrafiltração foi utilizada pela primeira vez na produção de queijos moles e do tipo “cottage”. Neste processo os constituintes do leite são fracionados em função da massa molar. Geralmente, proteínas e lipídios são completamente retidos no concentrado, enquanto a lactose, os sais minerais e as vitaminas, por apresentarem massa molar menores do que os poros médios das membranas, se dividem equitativamente entre o retentado e o permeado (Hinrichs, 2001; Kessler, 2002).

## **2.4 REOLOGIA**

A reologia é usualmente definida como sendo o estudo do escoamento e da deformação dos materiais, quando estes são submetidos a uma determinada tensão (Prentice et al., 1993; Fox et al., 2000). Em alimentos, o termo é freqüentemente usado referindo-se ao movimento, deformação e desintegração da amostra sob ação de uma força. Estudos reológicos são realizados como método de controle de qualidade em laticínios e como técnica de estudo da estrutura do produto (Tunick, 2000). Segundo Vélez-Ruiz e Barbosa-Cánovas (1997), a compreensão do comportamento reológico de qualquer alimento é importante nas seguintes etapas durante a sua fabricação: controle de qualidade dos ingredientes e produtos finais; projeto e avaliação de processos e equipamentos de operações unitárias; caracterização e desenvolvimento de produtos alimentícios para aceitabilidade do consumidor e elucidação da estrutura e relação entre estrutura e propriedades da textura.

Rao (1992) relata que as teorias clássicas que descrevem o comportamento reológico de materiais idealmente elásticos (no caso de sólidos) ou idealmente viscosos (no caso de líquidos), não são suficientes para explicar o comportamento de muitos materiais conhecidos, entre eles os alimentos sólidos e semi-sólidos. A maioria dos alimentos apresenta característica tanto de sólido elástico como de líquido viscoso, podendo assim ser explicado por teorias de elasticidade e viscoelasticidade. Sendo assim, o entendimento de conceitos básicos, como força, deformação, tensão e deformação relativa são importantes para descrever o seu comportamento reológico (Rao, 1992).

A viscosidade é considerada um dos principais parâmetros reológicos, pois é a medida da resistência do fluido ao escoamento quanto uma taxa de deformação é aplicada. O comportamento de um alimento durante o seu processo pode variar consideravelmente, pois a consistência e a composição do material podem ser alteradas durante as etapas de fabricação, contribuindo, portanto, para a alteração na viscosidade (Lewis, 1993; Prentice, 1993; Bhattacharya, 1997).

O comportamento dos fluidos é descrito através de modelos reológicos, que relacionam a tensão de cisalhamento com a taxa de deformação (Rao, 1992). O modelo reológico mais simples é o newtoniano, que apresenta uma relação linear entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação. Na literatura, são encontrados vários modelos reológicos, entretanto, a escolha de um modelo a ser utilizado é função das características do fluido (Rao, 1992; Tabilio-Munizaga e Barbosa-Canóvas, 2005).

O modelo de Ostwald-de Waele, também conhecido com Lei da Potência (equação 1), é mais comumente usado para descrever o comportamento reológico de fluidos, devido a sua fácil aplicação (Bird et al, 1960).

$$\eta = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad \text{Equação 1}$$

onde:

$k$  = índice de consistência (Pa.s<sup>n</sup>)

$\dot{\gamma}$  = taxa de deformação (s<sup>-1</sup>)

$n$  = índice de comportamento do fluxo (adimensional)

O parâmetro  $n$  da equação 1 define o comportamento do fluido em newtoniano ou não-newtoniano. Os fluidos newtonianos apresentam valor de  $n$  igual a 1, porém, quando apresentam comportamento não-newtoniano o valor de  $n$  é diferente de 1. Quando o valor é menor que 1, o fluido é considerado pseudoplástico, ou seja, a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de deformação. Se a viscosidade aparente aumenta com a taxa de deformação, o valor de  $n$  é maior que 1 e o fluido é considerado dilatante (Bird et al, 1960).

O efeito da temperatura na viscosidade é determinado a partir da relação de Arrhenius, modelo descrito na equação 2, que é aplicado na quantificação do efeito da temperatura nas propriedades de fluxo dos alimentos (Holdsworth, 1971; Rao, 1977).

$$\eta_a = \eta_\infty \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad \text{Equação 2}$$

onde:

$\eta_a$  = viscosidade aparente (mPa.s)

$\eta_\infty$  = viscosidade a uma temperatura infinita (mPa.s)

$E_a$  = energia de ativação (kcal.mol<sup>-1</sup>)

R = constante universal dos gases (kcal.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)

T = temperatura (K)

#### 2.4.1 FUNDAMENTOS DE REOLOGIA

A tensão pode ser definida como a intensidade dos componentes da força que age em um determinado ponto da superfície de um corpo, sendo expressa como força por unidade de área (Rao, 1992). A deformação relativa corresponde à mudança relativa na forma ou na dimensão de um corpo submetido a uma determinada tensão (Rao, 1992). Dependendo da direção de atuação da tensão, a deformação resultante pode ser definida como deformação normal ( $\epsilon$ ) ou deformação de cisalhamento ( $\gamma$ ) (Rao, 1992; Prentice et al., 1993).

A relação entre a tensão ( $\sigma$ ), aplicada perpendicularmente à superfície de um material, e deformação ( $\epsilon$ ) resultante, corresponde ao módulo de elasticidade ou módulo de Young (E), que pode ser expresso através da equação 3 (Prentice et al, 1993). Analogamente, pode-se definir o módulo de rigidez (G), aplicável quando a tensão ( $\tau$ ) é paralela à superfície do corpo (equação 4).

$$E = \sigma / \epsilon \quad \text{Equação 3}$$

$$G = \tau / \gamma \quad \text{Equação 4}$$

Um material elástico ideal é aquele que, quando submetido a uma tensão, sofre uma deformação instantânea e independente do tempo e quando cessa a aplicação da força, retorna à sua forma original. Para esse tipo de sólido, que pode ser representado por uma mola ideal, a magnitude da deformação é proporcional à magnitude da força aplicada, ou seja, o módulo elástico (E ou G) é constante (Rao, 1992). Convém destacar que essa relação possui validade quando o corpo em questão é elástico, homogêneo e isotrópico, o que é muito pouco comum na prática, em especial quando se trata de alimentos (Cunha, 2002). Entretanto, segundo Rao (1992), se a deformação for mantida no limite de elasticidade ideal, a teoria pode ser aplicada em algumas situações reais.

#### **2.4.2 VISCOELASTICIDADE E MODELOS VISCOELÁSTICOS**

A viscoelasticidade é uma propriedade de um material quando este apresenta, simultaneamente, propriedades elásticas de um sólido ideal e propriedades de fluidez de um líquido ideal (Bourne, 2002). As propriedades reológicas de um material viscoelástico estão relacionadas com o tempo de aplicação da tensão ou da deformação. Esta viscoelasticidade pode ser linear ou não-linear (Rao, 1992).

A viscoelasticidade linear ocorre quando as propriedades reológicas são dependentes apenas do tempo, e não da magnitude ou valor da tensão aplicada ao material (Bourne, 2002) e sempre haverá uma relação linear entre a tensão e a deformação (Rao, 1992). Muitos alimentos apresentam viscoelasticidade linear quando são aplicadas pequenas deformações até certo limite. Isso ocorre porque, quando a deformação é pequena, ou aplicada de forma suficientemente lenta, os arranjos moleculares estão muito próximos ao equilíbrio (Bourne, 2002). De acordo com

Cunha (1999), a resposta mecânica é apenas uma reflexão dos processos dinâmicos em nível molecular que ocorrem mesmo quando o sistema está em equilíbrio.

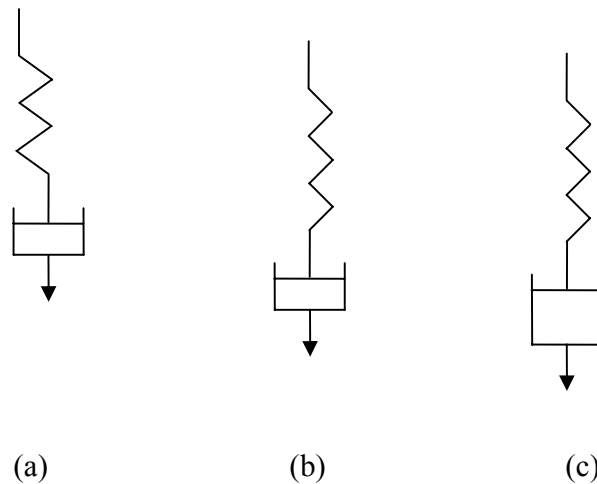
A viscoelasticidade não-linear ocorre quando as propriedades reológicas são funções do tempo, magnitude, e muitas vezes do valor da tensão aplicada (Bourne, 2002). Esse tipo de material pode não apresentar nenhuma zona elástica, e em geral é representado por relações não lineares entre tensão e a deformação (Rao, 1992).

O modelo aplicado para exemplificar a viscoelasticidade de materiais viscoelásticos sólidos e semi-sólidos é o corpo de Maxwell. O corpo de Maxwell é um modelo de dois elementos, composto por um sólido elástico ideal conectado em série com um fluido Newtoniano (Figura 5a) e constitui na representação física do modelo. Quando uma tensão é aplicada, o corpo sofre uma deformação inicial finita e instantânea (Figura 5b) devida exclusivamente ao elemento elástico. Após a deformação inicial, o elemento viscoso (líquido) começa a fluir, enquanto o elemento elástico permanece com a mesma deformação inicial (Figura 5c). O elemento viscoso pode ser representado por um pistão, que se move em um cilindro cheio de líquido (Rao, 1992). Ao contrário de sólidos elásticos, um fluido não suporta a tensão, e por isso a deformação varia constantemente quando a tensão é mantida (Fox et al., 2000). Para líquidos viscosos ideais, a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) é proporcional a taxa de deformação ( $dy/dt$ ), sendo a constante de proporcionalidade conhecida como coeficiente de viscosidade ( $\eta$ ) e demonstrada na equação 5 (Rao, 1992). A equação 5 demonstra a impossibilidade de um fluido newtoniano sofrer uma deformação instantânea, uma vez que, para isso, o coeficiente de viscosidade teria de ser igual a zero, o que não ocorre em situações reais (Rao, 1992).

$$\eta = \tau / (dy/dt) \quad \text{Equação 5}$$

O corpo de Maxwell é apenas um exemplo de modelo reológico. Muitos alimentos apresentam comportamentos viscoelásticos mais complexos que podem ser explicados por

modelos que combinam elementos elásticos e viscosos arranjados de diferentes maneiras (Cunha, 2002).



**Figura 5.** Resposta de um corpo de Maxwell à aplicação de uma tensão constante. (a) representação física de um corpo de Maxwell. (b) aplicação da tensão – o elemento elástico sofre uma deformação finita e instantânea. (c) manutenção da tensão – o elemento viscoso inicia a fluir e o elemento elástico permanece com a mesma deformação inicial.

Fonte: Rao (1992).

### 2.4.3 TESTE DE RELAXAÇÃO

O teste de relaxação se baseia na aplicação de uma deformação instantânea a um corpo e na manutenção dessa deformação durante todo o período do teste. A forma como o corpo reage à tensão imposta é então monitorada em função do tempo (Rao, 1992). No caso de alimentos, é importante que a deformação aplicada seja suficientemente pequena para minimizar a ocorrência de alterações estruturais no material (Cunha, 2002).

Rao (1992) descreve que as curvas características de relaxação para um corpo de Maxwell, podem ser usadas para determinar o módulo de elasticidade em função do tempo. O módulo de elasticidade é definido pela equação 6, onde  $E(t)$  é o módulo de elasticidade do corpo

como um todo em qualquer tempo  $t$ ,  $E_0$  é o módulo de elasticidade do elemento elástico e  $\tau = \eta/E_0$  é o tempo de relaxação para o modelo (Rao, 1992).

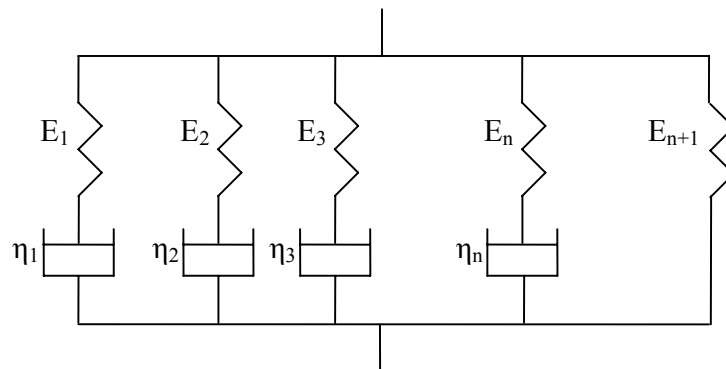
$$E(t) = E_0 \cdot e^{-t/(\eta/E)} \quad \text{Equação 6}$$

Uma curva de relaxação comum para muitos materiais viscoelásticos é aquela em que ocorre uma queda exponencial da tensão com o tempo, até um valor constante, porém diferente de zero. Portanto, um corpo de Maxwell não seria suficiente para descrever o comportamento viscoelástico, precisando-se incluir um elemento adicional, em paralelo, para representar a tensão residual. Esse modelo de três elementos é conhecido como o corpo de Poynting-Thomson (Reiner, 1971).

Usualmente, as curvas de relaxação são representadas por modelos compostos por um ou mais corpos de Maxwell em paralelo, com ou sem um elemento elástico (correspondente à tensão residual), também em paralelo. O modelo de Maxwell generalizado seria representado pela equação 7 (Rao, 1992).

$$E(t) = E_1 \cdot e^{-t/\tau_1} + E_2 \cdot e^{-t/\tau_2} + \dots + E_n \cdot e^{-t/\tau_n} + E_{n+1} \quad \text{Equação 7}$$

A Figura 6 mostra a representação física do modelo generalizado de Maxwell. Para materiais que são representados por esse tipo de modelo, o ajuste à curva experimental é tanto melhor quanto maior o número de elementos de Maxwell adicionados (Rao, 1992). No entanto, isso tornaria o modelo muito complexo, o que comprometeria sua aplicabilidade, além de dificultar a análise dos parâmetros (Prentice et al., 1993). Em geral apenas dois corpos de Maxwell em paralelo com um elemento elástico residual são suficientes para explicar o comportamento mecânico (Rao, 1992).



**Figura 6.** Representação física do modelo generalizado de Maxwell.  
Fonte: Rao (1992).

Com o objetivo de simplificar a análise dos parâmetros reológicos de alimentos, Peleg (1979) propôs a linearização da curva do modelo de Maxwell generalizado. Assim, as curvas de relaxação foram normalizadas e ajustadas às equações 8 ou 9, onde,  $F_0$  é a força inicial aplicada,  $F(t)$  é a força após  $t$  minutos e  $a$  e  $b$  são constantes que representam as propriedades mecânicas do material estudado. Segundo Peleg (1980), o parâmetro  $a$  representa o valor assintótico em que a tensão se reduz durante a relaxação. Esse parâmetro pode ser usado para calcular o módulo de elasticidade residual. Quando  $a$  é igual a 0, não há queda na tensão (comportamento de um sólido elástico ideal) e, quando  $a$  é igual a 1, a tensão final chega a zero (comportamento de um líquido). Entretanto, o parâmetro  $b$  representa a taxa com que a tensão diminui ( $1/b$  é o tempo necessário para atingir o nível  $a/2$ ). Nos sólidos viscoelásticos, quanto menor o valor de  $b$  mais lenta é a relaxação da tensão (Cunha, 2002).

$$(F_0 - F(t)) = (a \cdot b \cdot t) / (1 + b \cdot t) \quad \text{Equação 8}$$

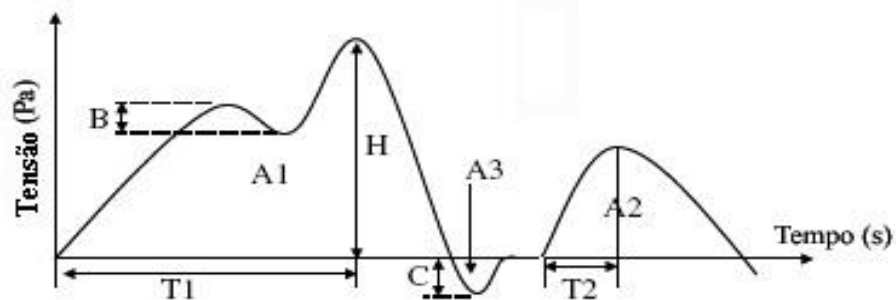
$$t \cdot F_0 / (F_0 - F(t)) = 1(a \cdot b) + t/a \quad \text{Equação 9}$$



### 2.4.1 ANÁLISE INSTRUMENTAL DO PERFIL DE TEXTURA

A Organização Internacional de Padronização define textura de um alimento como, “todos os atributos reológicos e estruturais (geométrica e superficial) perceptíveis de um produto por meio mecânico, tátil, e, onde apropriado, recepção visual e auditiva” (ISO, 1992). Por esta definição, todo alimento lácteo possui textura que o define em termos de qualidade, quando comparados com padrões pré-estabelecidos. Portanto, a textura é uma característica importante usada para diferenciar e classificar variedades de queijos (Antoniou et al., 2000; Wendin et al., 2000) e é considerada pelos consumidores como uma referência na qualidade e preferência global (Guinard e Mazzucchelli, 1996).

A análise instrumental do perfil de textura resulta em um gráfico característico para cada tipo de produto, permitindo avaliar parâmetros como a adesividade, a coesividade, elasticidade e a firmeza através de  $A_3$ , de  $A_2/A_1$ , de  $T_2/T_1$  e de  $H$ , respectivamente (Figura 7). O teste é realizado com o auxílio de um equipamento denominado analisador de textura, provido de corpos de prova (probe) fabricados para testes na indústria de alimentos (Szczesniak, 1963a; Szczesniak 1963b; Bourne, 2002; Foegeding et al., 2003) Desta forma, consegue-se medir as propriedades físicas, relacionando-as com a percepção dinâmica da textura (Foegeding et al., 2003).



**Figura 7.** Representação gráfica da análise instrumental do perfil de textura.  
Fonte: Kealy, (2006).

Os queijos, em geral, são considerados materiais viscoelásticos (Fox et al., 2000). Vários fatores, principalmente de sua composição físico-química, são conhecidos por influenciar a textura dos queijos, como exemplo, os teores de proteína, gordura, sal, minerais e pH (Visser, 1991).

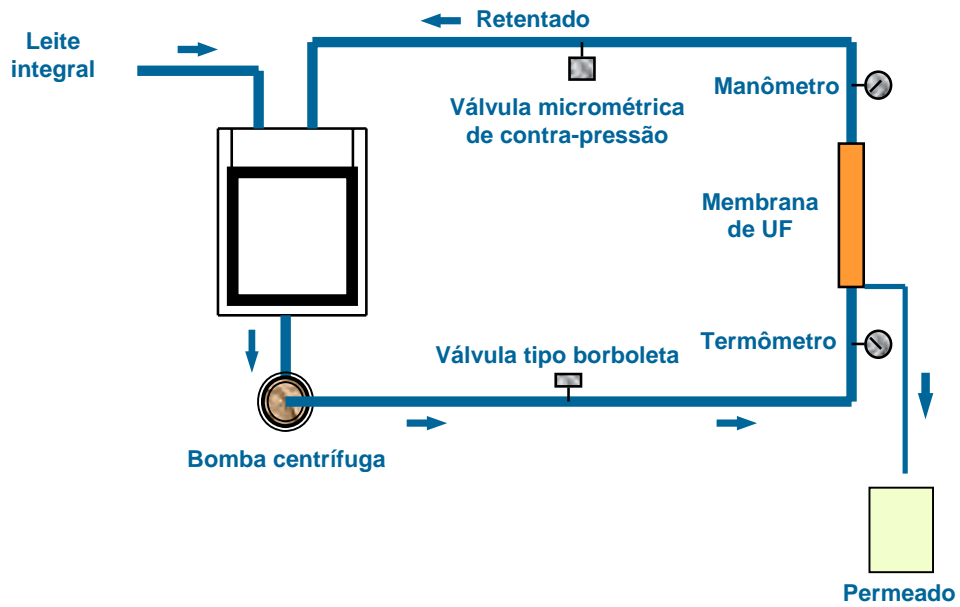
### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 MATERIAL**

Nos experimentos foi utilizado leite pasteurizado, homogeneizado, padronizado a 3% de gordura, 11,46% de sólidos totais, 3% de proteína total e 8,45% de extrato seco desengordurado, coagulante enzimático HA-LA (Chr. Hansen®), ácido láctico, cloreto de cálcio e sal. Todos os reagentes utilizados foram de qualidade p.a. e as soluções devidamente padronizadas.

#### **3.2 ULTRAFILTRAÇÃO (UF)**

O processo de ultrafiltração (UF) do leite foi realizado em uma unidade piloto (Figura 8), utilizando-se membrana orgânica de polissulfona com configuração espiral (Romicon®) (Figura 9), com 4,7 m<sup>2</sup> de área filtrante útil e ponto de corte médio de retenção de 10 kDa. Utilizou-se temperatura de processo de 45 ± 5 °C e pressão transmembrana de 2,6 ± 0,2 bar. Em cada processamento foi utilizado um volume inicial de 80 litros de leite. Antes, e após cada etapa de UF, o equipamento e a membrana foram higienizados de acordo com as instruções do fabricante. Os experimentos foram realizados em triplicata.



**Figura 8.** Esquema simplificado da unidade piloto de ultrafiltração utilizada nos experimentos.  
Fonte: Desenho do autor



**Figura 9.** Membrana orgânica de polissulfona de configuração espiral (Romicon<sup>®</sup>) utilizada nos experimentos.  
Fonte: Foto do autor.

### 3.2.1 CÁLCULO DO FATOR DE REDUÇÃO VOLUMÉTRICA (FRV)

Durante o processo de ultrafiltração foram realizados os cálculos do Fator de Redução Volumétrica (FRV), conforme a Equação 10 (Girard e Fukumoto, 2000; Atra et al., 2005).

$$FRV = \frac{\text{volume inicial de leite (L)}}{\text{volume de retentado (L)}} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

Volume de retentado (L) = volume inicial de leite (L) – volume de permeado (L)

A cada variação de 0,5 nos valores de FRV, foram retiradas amostras de retentados. Estas amostras foram utilizadas na preparação dos queijos e nas medidas das propriedades reológicas de fluxo.

### 3.2.2 CÁLCULO DO FLUXO DE PERMEADO (J)

O fluxo permeado (J) durante o processo de ultrafiltração do leite foi determinado através da equação 11.

$$J = \frac{V_p}{t.A} \quad (\text{L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}) \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

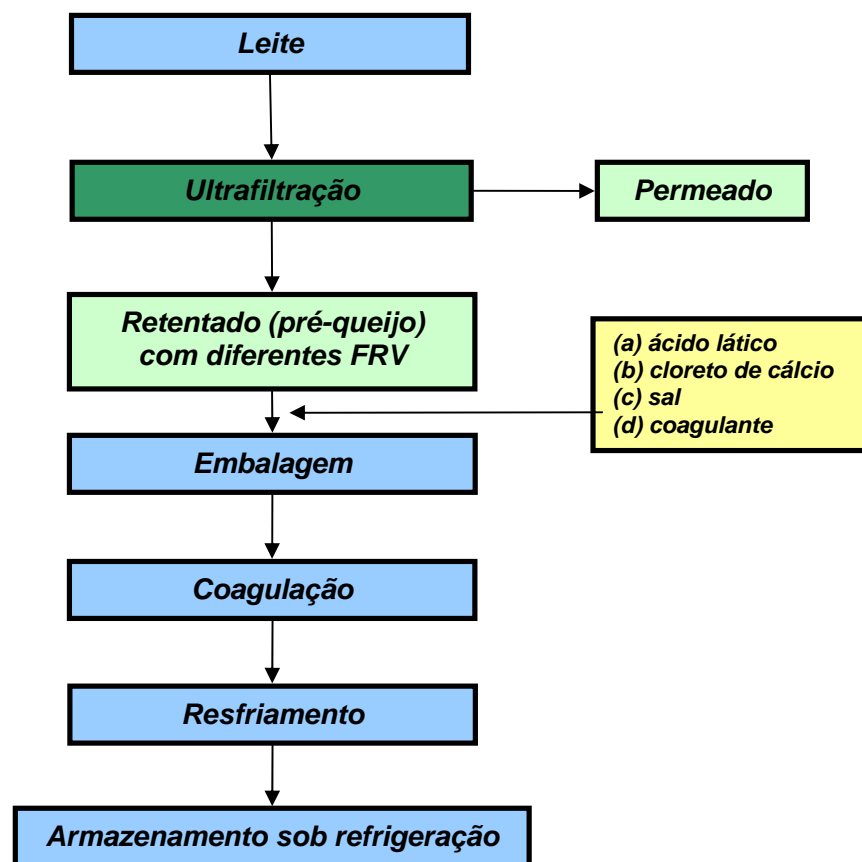
V<sub>p</sub> = volume de permeado (L)

t = tempo (h)

A = área filtrante útil (m<sup>2</sup>)

### 3.3 PREPARAÇÃO DOS QUEIJOS TIPO MINAS FRESCAL

Os queijos tipo Minas Frescal foram preparados a partir dos retentados obtidos dos diferentes FRV, conforme fluxograma apresentado na Figura 10. Os FRV empregados na obtenção dos queijos foram determinados a partir de testes preliminares.



**Figura 10.** Fluxograma da preparação dos queijos tipo Minas Frescal a partir dos retentados em diferentes FRV.

A partir de testes preliminares foram definidos os teores de ácido láctico (0,0225% em relação ao volume inicial de leite), cloreto de cálcio (0,0225% em relação ao volume inicial de leite) e sal (1,5% em relação ao volume de retentado) utilizados nos queijos. Retentados, à

temperatura de  $37 \pm 1$  °C, adicionados de ácido láctico, cloreto de cálcio, sal e coalho (quantidade indicada pelo fabricante), foram transferidos para embalagens comerciais (250 mL), coagulados também à temperatura de  $37 \pm 1$  °C por 40 minutos, resfriados e mantidos sob refrigeração ( $5 \pm 2$  °C) durante 24 horas antes da realização das análises físico-químicas, rendimento e testes.

### 3.4 ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA

Os queijos foram submetidos as seguintes análises físico-químicas: umidade (% m/m), sólidos totais (%m/m), proteínas totais (% m/m) e lipídios (% m/m) (AOAC, 1998). A determinação dos pHs foi feita através de pHmetro (pH330i, WTW). Todas as análises foram realizadas em duplicata.

### 3.5 RENDIMENTO

O rendimento na produção dos queijos foi calculado utilizando-se a equação 12:

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{volume de retentado coagulado(L)}}{\text{volume de leite(L)}} \quad \text{Equação 12}$$

Devido às diferenças nos teores de umidade dos queijos fabricados, foi realizado o cálculo do rendimento ajustado (RAJ), utilizando a equação 13, para efeito de comparação, considerando o teor de umidade desejado de 70% (Cunha et al., 2004).

$$\text{RAJ} = \frac{(\text{rendimento}) \times 100 - (\% \text{umidade real})}{100 - (\% \text{umidade desejada})} \quad \text{Equação 13}$$

### 3.6 MEDIDAS DAS PROPRIEDADES DE FLUXO

As medidas das propriedades de fluxo dos retentados, para os diferentes FRV, foram realizadas em reômetro rotacional (Brookfield Engineering Laboratories model DV III Ultra, Stoughton, MA, USA), com cilindro concêntrico (*spindle* ULA). A tensão de cisalhamento foi aumentada linearmente a cada  $6,11 \pm 0,01$  ( $s^{-1}$ ) durante 20 minutos. Os dados foram adquiridos utilizando o software Rheocalc<sup>®</sup> 32 (versão 2.5) (Brookfield Engineering Laboratories). Estas medidas foram determinadas a 5, 10, 37 e 45 °C, para cada FRV. As curvas de fluxo foram descritas pelo modelo da lei da Potência:  $\eta = k.\gamma^n$ , onde  $k$  = índice de consistência ( $Pa.s^n$ ),  $\gamma$  = taxa de deformação ( $s^{-1}$ ) e  $n$  = índice de comportamento do fluxo (adimensional). O efeito da temperatura nas medidas das viscosidades dos retentados obtidos a partir dos diferentes FRV, foi determinado através do modelo de Arrhenius:  $\eta_a = \eta_\infty \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$ , onde  $\eta_a$  = viscosidade aparente (mPa.s),  $\eta_\infty$  = viscosidade a uma temperatura infinita (mPa.s),  $E_a$  = energia de ativação de fluxo ( $kcal.mol^{-1}$ ),  $R$  = constante universal dos gases ( $kcal.mol^{-1}.K^{-1}$ ) e  $T$  = temperatura (K). A inclinação da curva obtida representa a  $E_a$  de cada retentado.

#### 3.6.1 TESTE DE RELAXAÇÃO

O teste de relaxação foi realizado através da compressão das amostras em um texturômetro TA-XT2i (Stable Micro Systems). Mediu-se a queda da força durante 10 minutos após compressão da amostra, com velocidade igual a 1mm/s. A deformação foi igual a 10% da altura inicial da amostra.

##### 3.6.1.1 AJUSTE DA FUNÇÃO EXPONENCIAL

De acordo com Peleg (1979), foram plotadas curvas usando a relação  $F(t)/F_0$  versus tempo, onde  $F(t)$  é a força instantânea durante o tempo de relaxação e  $F_0$  é a força inicial (após parada do probe). As curvas foram ajustadas a um modelo viscoelástico com dois elementos de Maxwell e um elemento elástico em paralelo, conforme a equação 14.



$$F'(t) = \frac{F(t)}{F_0} = S_0 + S_1 \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) + S_2 \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) \quad \text{Equação 14}$$

onde,  $S_0$ ,  $S_1$  e  $S_2$  são constantes que dependem das propriedades viscoelásticas do material e  $\tau_1$  e  $\tau_2$  são os tempos de relaxação.

O módulo de elasticidade foi calculado usando:

$$E(t) = E_0 + E_1 \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) + E_2 \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right),$$

onde,  $E_1$  e  $E_2$  são os módulos de elasticidade dos elementos 1 e 2, e  $E_0$ , o módulo de elasticidade de equilíbrio, ou módulo de elasticidade a um tempo infinito.  $E_0$ ,  $E_1$  e  $E_2$  foram obtidos a partir dos coeficientes  $S_0$ ,  $S_1$  e  $S_2$  de acordo com a relação:

$$E_i = \frac{S_i \cdot F}{\epsilon \cdot A_0} \quad i = 1, 2, 0$$

onde,  $A_0$  representa a área de compressão e  $\epsilon = 1 - \frac{H}{H_0}$  é a deformação.

O valor da viscosidade do elemento  $i$  ( $\eta_i$ ) foi estimado como:

$$\eta_i = E_i \cdot \tau_1$$

### **3.6.1.2 LINEARIZAÇÃO DAS CURVAS DE RELAXAÇÃO ATRAVÉS DO MODELO DE PELEG**

As curvas de relaxação foram linearizadas pelo modelo de Peleg (Peleg, 1980). Os parâmetros  $a$  e  $b$  foram determinados através da regressão linear a partir dos dados experimentais obtidos da normalização das curvas de relaxação.

### **3.6.2 ANÁLISE INSTRUMENTAL DO PERFIL DE TEXTURA (TPA)**

A análise instrumental do perfil de textura das amostras dos queijos foi realizada em um texturômetro TA-XT2i (Texas Instruments). A deformação foi de 80% da altura inicial da amostra, e a velocidade de compressão de 2 mm/s. Amostras de 21 mm de altura e 20 mm de diâmetro foram retiradas dos queijos imediatamente após serem removidas do refrigerador, e testadas em temperatura aproximada de 7 °C. Firmeza, elasticidade, coesividade, e adesividade foram determinadas analisando os dados de acordo com Bourne (2002).

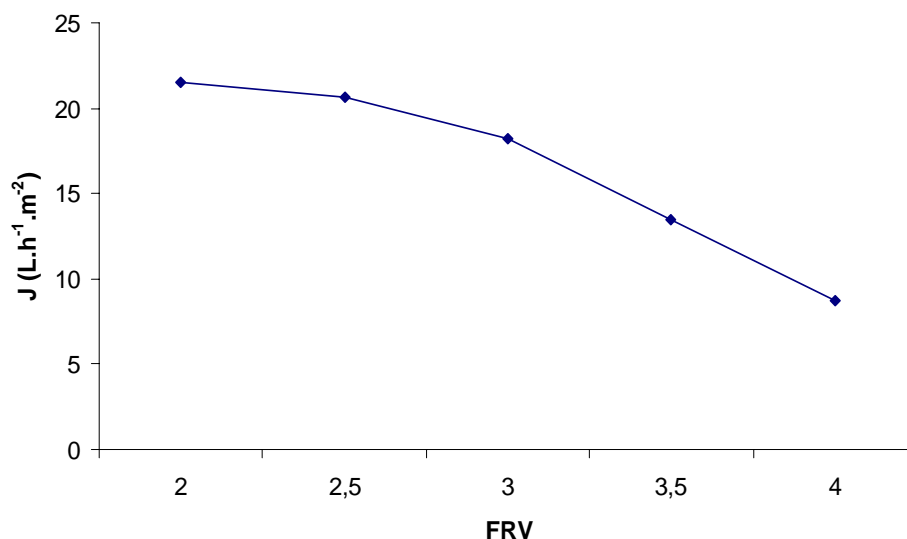
### **3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA**

Os resultados foram analisados através de Análise de Variância (ANOVA), utilizando-se o teste de Tukey para verificar diferenças entre as médias, com auxílio do *software* STATISTICA<sup>®</sup> versão 6.0 (Statsoft, 2001), com 5 % de significância. A análise da regressão linear e não-linear empregadas na reologia dos queijos foi realizada empregando-se o *software* ORIGIN PRO<sup>®</sup> 7.5 SR2 versão 7.5817 (OriginLab, 2003).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ULTRAFILTRAÇÃO DO LEITE

A Figura 11 apresenta a curva de fluxo do permeado em função do FRV. Observa-se que houve redução quase linear ( $R^2 = 0,93$ ) no fluxo permeado médio em função do FRV empregado. Esta redução de fluxo é atribuída a colmatagem progressiva da membrana em função do tempo de processo. Este fenômeno é, ainda, agravado pelo aumento da viscosidade do leite devido à concentração de sólidos, pelo teor de gordura e de proteína, que de acordo com Makardij et al. (1999) aumentam proporcionalmente com o aumento do FRV. Resultados semelhantes foram encontrados por Bowen et al. (2002) e James et al. (2003) que apresentaram as formas e os efeitos da colmatagem durante a concentração de leite ao utilizarem a tecnologia de separação por membrana. É relevante fazer algumas observações em relação aos aspectos tecnológicos e econômicos na fabricação do queijo Minas Frescal a partir do leite concentrado por ultrafiltração a diferentes FRV. Primeiramente, sabe-se que, mantendo-se a qualidade final do produto dentro de padrões pré-estabelecidos, a rentabilidade do produto estará inversamente relacionada ao FRV. Ou seja, quanto menor o seu valor, maior será o rendimento final do processo de fabricação do queijo e, como consequência, maior a rentabilidade.



**Figura 11.** Comportamento do fluxo do permeado (J) médio durante a concentração do leite em função do FRV.

## 4.2 ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA

Os teores de umidade (Tabela 6) dos queijos tipo Minas Frescal obtidos a partir dos retentados apresentaram valores mais elevados do que os queijos produzidos pelo método tradicional, que variam entre 46 e 60 % (Silva et al., 2005). Usualmente, queijos produzidos por ultrafiltração apresentam teores de umidade mais elevados, devido à incorporação de proteínas do soro, aumentando a capacidade de retenção de água (Lawrence, 1989; Mehaia, 2002). Entretanto, como era esperado, os teores de umidade dos queijos diminuíram significativamente com o aumento do FRV. Trabalhos realizados por Hydamaka et al. (2001), utilizando tecnologia de membranas para a produção de queijos diretamente acidificados e com FRV, variando entre 2 e 4, observaram, também, que o aumento do FRV produzia queijos com menores teores de umidade. Neste mesmo trabalho, os autores constataram que queijos elaborados com maior FRV apresentaram teores mais elevados de proteína e gordura.

**Tabela 6.** Composição média percentual dos queijos fabricados a partir dos retentados.

Constituinte % (m/m)	Queijos			
	**FRV			
	2,5	3,0	3,5	4,0
Umidade	79,46 <sup>2a</sup>	77,23 <sup>b</sup>	74,96 <sup>c</sup>	71,77 <sup>d</sup>
Gordura	7,70 <sup>d</sup>	9,07 <sup>c</sup>	10,62 <sup>b</sup>	11,61 <sup>a</sup>
Proteína	7,23 <sup>d</sup>	8,78 <sup>c</sup>	10,16 <sup>b</sup>	11,17 <sup>a</sup>
S/U <sup>1</sup>	1,88 <sup>d</sup>	1,94 <sup>c</sup>	2,00 <sup>b</sup>	2,09 <sup>a</sup>
pH	6,54 <sup>a</sup>	6,48 <sup>a</sup>	6,51 <sup>a</sup>	6,49 <sup>a</sup>
Sólidos totais	20,54 <sup>d</sup>	22,77 <sup>c</sup>	25,04 <sup>b</sup>	28,23 <sup>a</sup>

<sup>1</sup>Relação Sal/Umidade

<sup>2</sup>Médias com letras iguais, na mesma linha, não diferem significativamente entre si (p>0,05).

\*\*FRV = Fator de Redução Volumétrica.

Embora não apresentando diferença entre os diversos tratamentos, o valor de pH foi maior do que o queijo Minas Frescal fabricado pelo método tradicional, acidificado com ácido láctico, conforme relata Silva et al. (2003), onde o pH apresentou uma variação entre 4,9 e 5,3. Por outro lado, os valores de pHs encontrados no presente trabalho, estão de acordo com aqueles

encontrados por Carvalho et al. (2007). Estes autores avaliaram 31 amostras de cinco marcas comerciais de queijos fabricados pelo método MMV, sendo que estes queijos apresentaram um valor de pH médio de 6,5. Segundo Mehaia (2002), a manutenção do pH mais elevado pode ser consequência do poder tamponante causado pela alta concentração de sais de cálcio e uma maior concentração de proteínas do soro (albuminas e globulinas) em base seca, devido ao processo de ultrafiltração. É importante ressaltar que valores de pH mais elevados reduzem a vida de prateleira dos queijos, principalmente a teores elevados de umidade.

### 4.3 RENDIMENTO

A Tabela 7 apresenta os rendimentos e os rendimentos ajustados no processo de fabricação dos queijos, calculados em função dos diferentes FRV. Como esperado, os rendimentos diminuíram significativamente com o aumento do FRV. Esta redução é decorrente do aumento do volume de permeado durante a UF. Segundo Hydamaka (2001), a inclusão das proteínas do soro no queijo, reduz ou elimina a etapa de dessoragem da massa e, conseqüentemente, aumenta o rendimento.

Por outro lado, os rendimentos ajustados a um teor de umidade desejado de 70%, foram inferiores para maiores FRV. O valor desejado do teor de umidade foi escolhido por aproximar-se do valor médio ( $67,2 \pm 2,8$  kg queijo/100 kg leite) encontrado por Carvalho et al. (2007) na avaliação de queijos Minas Frescal fabricados pelo método MMV.

**Tabela 7.** Rendimento médio dos queijos fabricados a partir dos retentados de FRV 2,5, 3, 3,5 e 4.

Rendimento	Queijos			
	**FRV			
(kg queijo/100 kg leite)	2,5	3,0	3,5	4,0
Rendimento de fabricação	40 <sup>1a</sup>	33,3 <sup>b</sup>	28,57 <sup>c</sup>	25 <sup>d</sup>
Rendimento ajustado	27,38 <sup>a</sup>	25,27 <sup>b</sup>	23,84 <sup>c</sup>	23,52 <sup>d</sup>

<sup>1</sup>Médias com letras iguais, na mesma linha, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ).

\*\*FRV = Fator de Redução Volumétrica.

Resultados encontrados por Campos (2000) para queijos Minas Frescal, fabricados por acidificação direta a partir de leite com 3% de gordura, acidificados com ácido lático, foram de 16% para ambos os rendimentos (fabricação e ajustado).

#### 4.4 MEDIDAS DA VISCOSIDADE DOS RETENTADOS

As Tabelas 8 e 9 apresentam, respectivamente, os valores das medidas da viscosidade aparente e índice de comportamento do fluxo dos retentados obtidos em função dos diferentes FRV, a diferentes temperaturas. A viscosidade aparente (Tabela 8) dos retentados aumentou significativamente com o aumento do FRV para cada temperatura em que foi realizada a medição. Houve uma boa correlação da viscosidade aparente ( $R^2 = 0,99$ ) com o modelo da lei da potência para todos retentados obtidos. Todos apresentaram comportamento Newtoniano (Tabela 9) e, como esperado, a viscosidade aparente aumentou com o aumento do FRV e diminuiu com o aumento da temperatura. Os valores da viscosidade aparente encontrados, estão de acordo com Vélez-Ruiz e Barbosa-Cánovas (1998) que avaliaram leites concentrados por evaporação e Mun et al. (1999) ao estudarem a viscosidade de leites integrais e desnatados concentrados por ultrafiltração.

**Tabela 8.** Viscosidade aparente dos retentados nas temperaturas de 5, 10, 37 e 45°C.

Temperatura (°C)	$\eta$ (mPa.s)			
	**FRV			
	FRV 2,5	FRV 3	FRV 3,5	FRV 4
5	7,90 <sup>1d</sup>	12,60 <sup>c</sup>	19,70 <sup>b</sup>	36,90 <sup>a</sup>
10	6,20 <sup>d</sup>	9,30 <sup>c</sup>	14,80 <sup>b</sup>	24,20 <sup>a</sup>
37	2,70 <sup>d</sup>	3,60 <sup>c</sup>	4,90 <sup>b</sup>	6,80 <sup>a</sup>
45	2,40 <sup>d</sup>	2,80 <sup>cd</sup>	3,70 <sup>b</sup>	6,20 <sup>a</sup>

<sup>1</sup>Médias com letras iguais, na mesma linha, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ).

\*\*FRV = Fator de Redução Volumétrica.

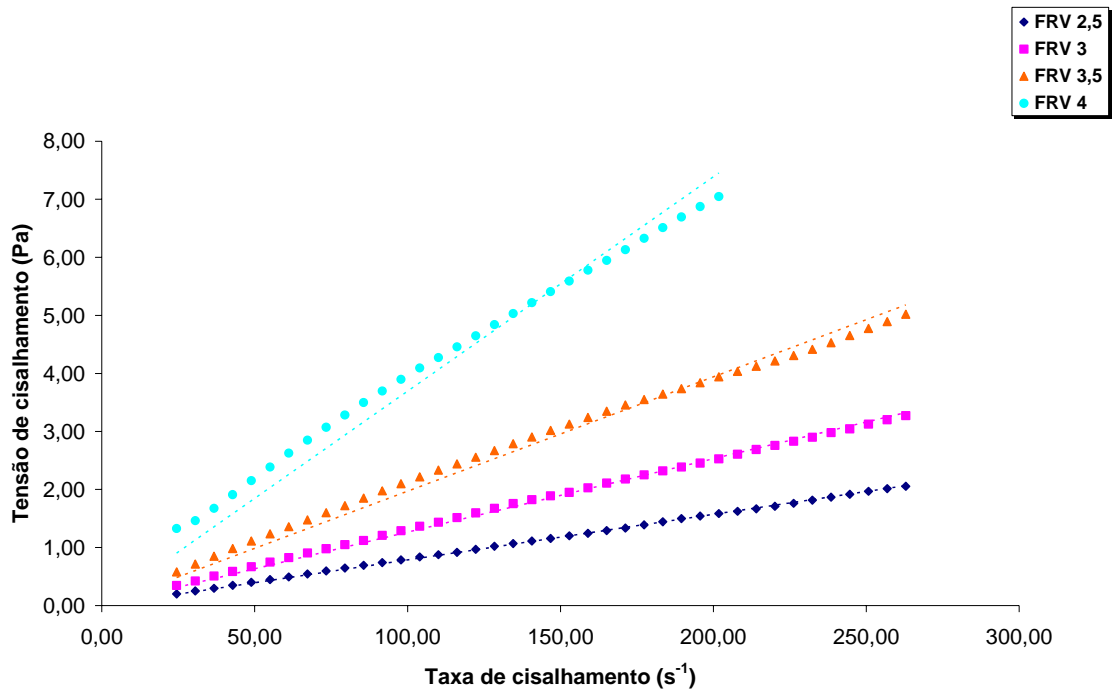
**Tabela 9.** Índice de comportamento do fluxo dos retentados nas temperaturas de 5, 10, 37 e 45°C.

Temperatura (°C)	n			
	**FRV			
	FRV 2,5	FRV 3	FRV 3,5	FRV 4
5	1,0 <sup>1a</sup>	1,0 <sup>a</sup>	1,0 <sup>a</sup>	1,0 <sup>a</sup>
10	1,0 <sup>a</sup>	1,0 <sup>a</sup>	1,0 <sup>a</sup>	1,0 <sup>a</sup>
37	1,0 <sup>a</sup>	1,0 <sup>a</sup>	1,0 <sup>a</sup>	1,0 <sup>a</sup>
45	1,0 <sup>a</sup>	1,0 <sup>a</sup>	1,0 <sup>a</sup>	1,0 <sup>a</sup>

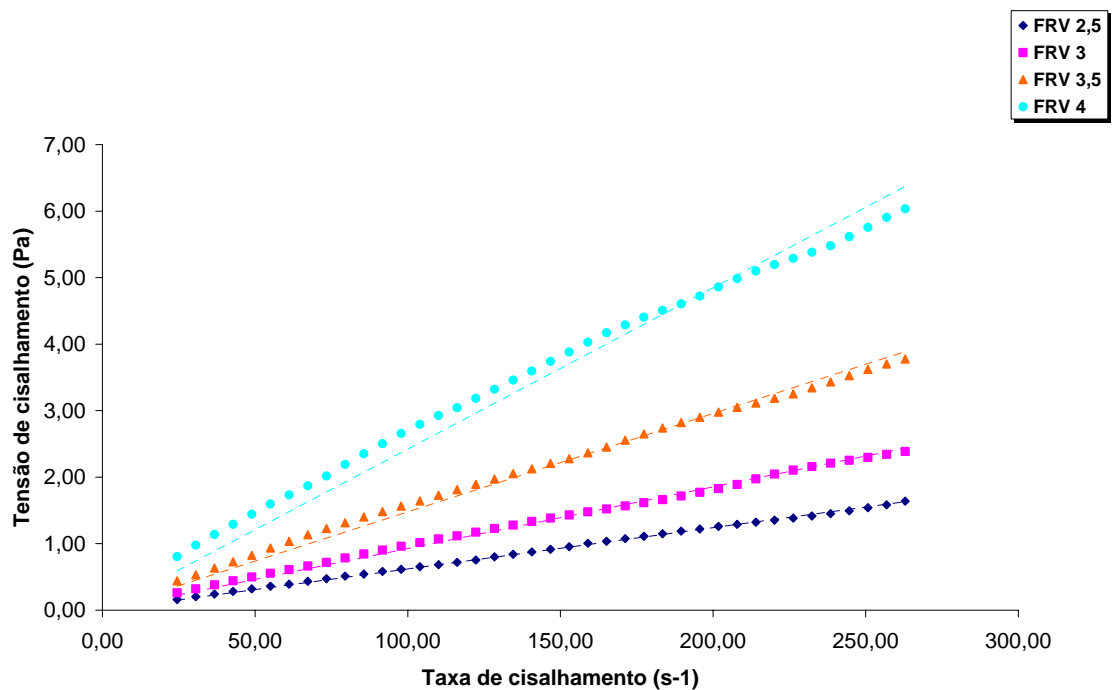
<sup>1</sup>Médias com letras iguais, na mesma linha, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ).

\*\*FRV = Fator de Redução Volumétrico.

As Figuras 12, 13, 14 e 15 apresentam as curvas de fluxo para os retentados obtidos nos diferentes FRV. Verifica-se que houve um aumento maior na viscosidade para menores temperaturas quando se consideram os mesmos valores de FRV e uma redução da viscosidade com o aumento da temperatura quando considerado um determinado FRV.

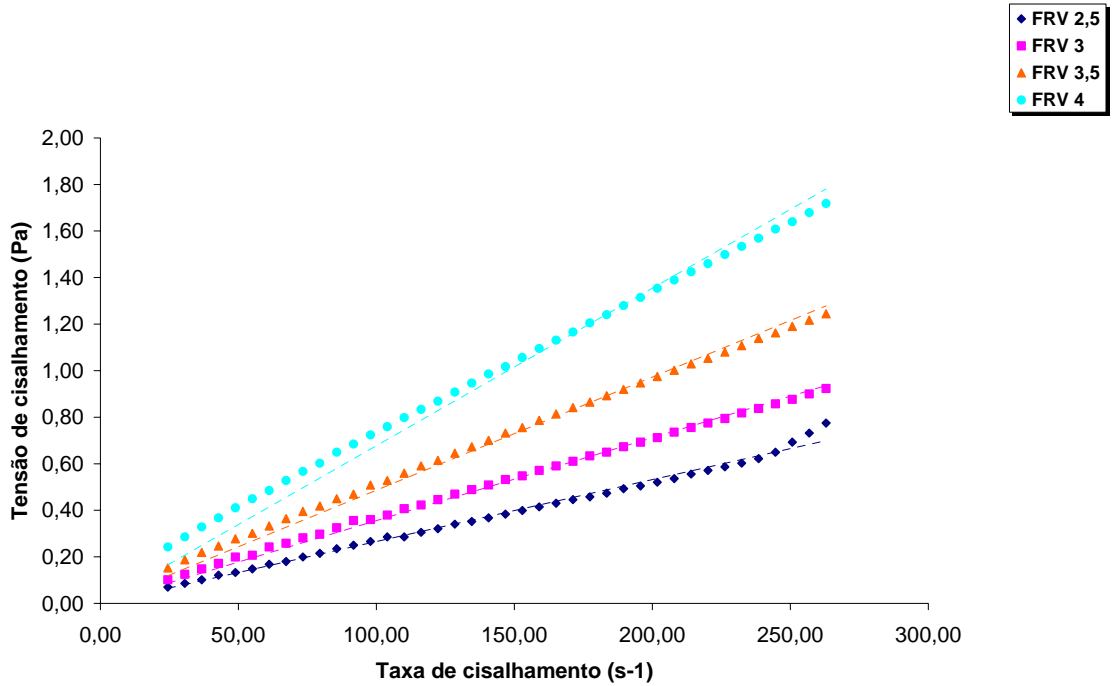


**Figura 12.** Relação entre a taxa de deformação/tensão de cisalhamento (curvas de fluxo) para os retentados obtidos nos diferentes FRV a 5°C, durante um ciclo ascendente de tensão de cisalhamento entre 24,46 e 262,95 s<sup>-1</sup>.

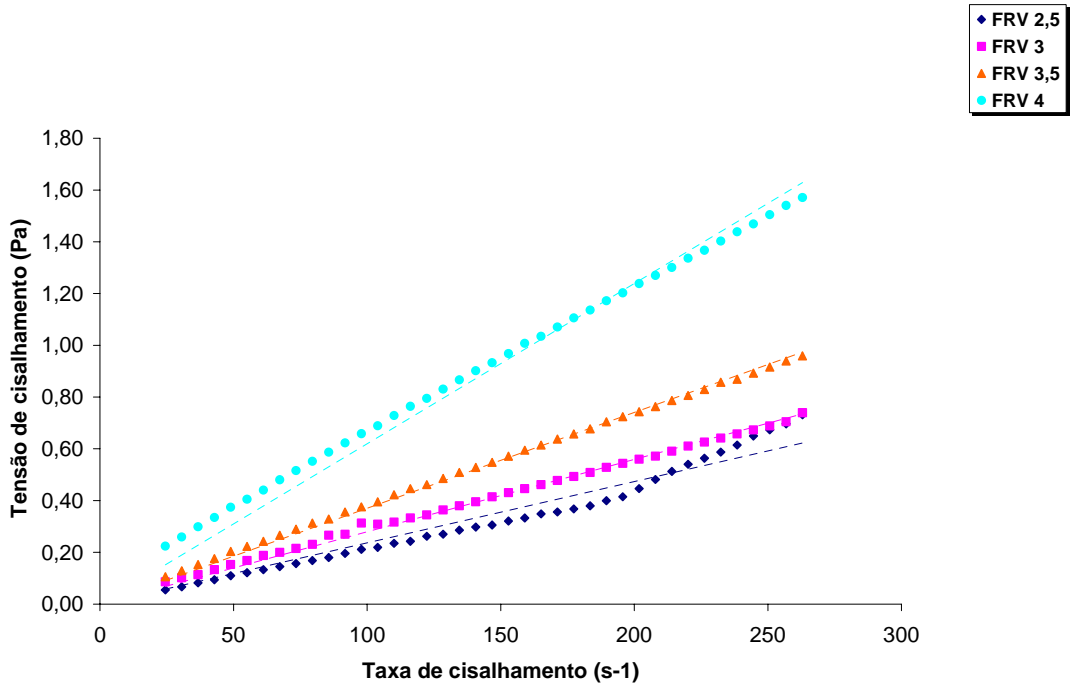


**Figura 13.** Relação entre a taxa de deformação/tensão de cisalhamento (curvas de fluxo) para os retentados obtidos nos diferentes FRV a 10°C, durante um ciclo ascendente de tensão de cisalhamento entre 24,46 e 262,95 s<sup>-1</sup>.





**Figura 14.** Relação entre a taxa de deformação/tensão de cisalhamento (curvas de fluxo) para os retentados obtidos nos diferentes FRV a 37°C, durante um ciclo ascendente de tensão de cisalhamento entre 24,46 e 262,95 s<sup>-1</sup>.



**Figura 15.** Relação entre a taxa de deformação/tensão de cisalhamento (curvas de fluxo) para os retentados obtidos nos diferentes FRV a 45°C, durante um ciclo ascendente de tensão de cisalhamento entre 24,46 e 262,95 s<sup>-1</sup>.

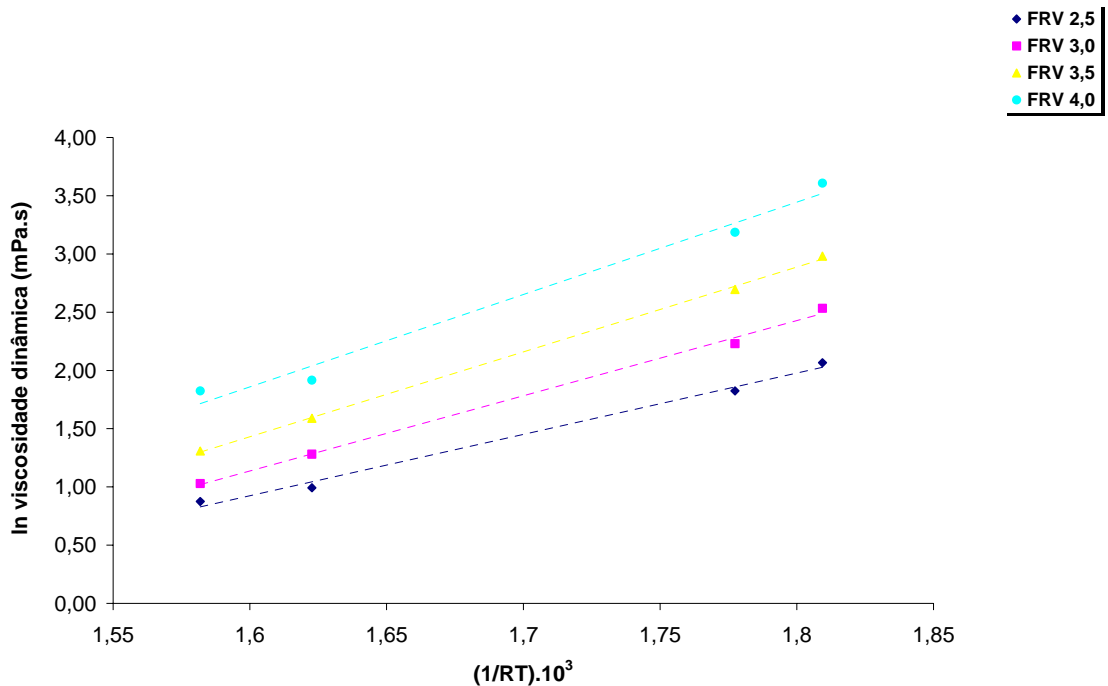
A Tabela 10 apresenta o efeito da temperatura nas medidas das viscosidades dos retentados obtidos a partir dos diferentes FRV, e determinada através do modelo de Arrhenius, e assim encontrando a energia de ativação de fluxo (Figura 16). Houve boa correlação dos valores de energia de ativação de fluxo encontrados ( $R^2 = 0,99$ ) com a relação de Arrhenius, verificando-se um aumento ( $p < 0,05$ ) destes valores com o aumento do FRV. Erdem (2006) observou que ocorrem mudanças na hidrofobicidade das micelas de proteína e aumento da energia de ativação de fluxo durante e após a ultrafiltração, ou seja, ocorreu uma reorganização da estrutura protéica tornando-se mais compacta com a ultrafiltração e esta estrutura se torna mais forte devido ao aumento da concentração e aquecimento do retentado. Desta forma, mais energia será necessária para abrir a estrutura micelar, principalmente quando são utilizados maiores valores de FRV.

**Tabela 10.** Energias de ativação de fluxo dos retentados em função dos diferentes FRV e temperatura da medida da viscosidade.

*FRV	Ea (kcal.mol <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup> (coeficiente de correlação)
2,5	5,27 <sup>d</sup>	0,9964
3,0	6,45 <sup>c</sup>	0,9984
3,5	7,28 <sup>b</sup>	0,9996
4,0	7,93 <sup>a</sup>	0,9915

\*FRV: Fator de Redução Volumétrica.

<sup>1</sup>Médias com letras iguais, na mesma coluna, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ).



**Figura 16.** Efeito da temperatura na viscosidade dos retentados a diferentes FRV.

#### 4.5 REOLOGIA DOS QUEIJOS

Houve boa correlação das curvas, obtidas experimentalmente ( $R^2 > 0,99$ ), com o modelo generalizado de Maxwell com  $n=2$ . A Tabela 11 mostra os parâmetros  $S_0$ ,  $S_1$  e  $S_2$  e  $\tau_1$  e  $\tau_2$ , obtidos a partir da análise de regressão não-linear.

**Tabela 11.** Valores dos parâmetros obtidos pela regressão não-linear utilizados para calcular os módulos de elasticidade e viscosidades do modelo generalizado de Maxwell.

Modelo de Maxwell	Queijos			
	**FRV			
Parâmetros	2,5	3,0	3,5	4,0
$S_0$ (Pa)	0,024	0,045	0,075	0,140
$S_1$ (Pa)	0,332	0,300	0,288	0,284
$S_2$ (Pa)	0,525	0,522	0,503	0,487
$\tau_1$ (Pa.s)	17,220	17,420	18,840	17,930
$\tau_2$ (Pa.s)	204,360	260,020	283,910	301,900

\*\* FRV = Fator de Redução Volumétrica

A Tabela 12 mostra que a evolução dos parâmetros  $E_0$ ,  $E_1$  e  $E_2$  em função dos retentados com FRV 2,5, 3, 3,5, e 4. Os parâmetros diferiram ( $p < 0,05$ ) entre si em relação ao FRV utilizado na fabricação dos queijos, indicando que quanto maior o FRV, o produto apresenta maior tendência de recuperar sua forma original, quando removida a tensão que age sobre ele.

**Tabela 12.** Valores dos módulos de elasticidade e viscosidade do modelo generalizado de Maxwell.

Modelo de Maxwell	Queijos			
	**FRV			
Parâmetros	2,5	3,0	3,5	4,0
$E_0$ (Pa)	190,79 <sup>1d</sup>	450,28 <sup>c</sup>	1136,80 <sup>b</sup>	2635,55 <sup>a</sup>
$E_1$ (Pa)	2693,29 <sup>d</sup>	3004,74 <sup>c</sup>	4339,40 <sup>b</sup>	5373,12 <sup>a</sup>
$E_2$ (Pa)	4262,75 <sup>d</sup>	5233,52 <sup>c</sup>	7580,07 <sup>b</sup>	9203,01 <sup>a</sup>
$\eta_1$ (Pa.s)	46365,33 <sup>d</sup>	52319,71 <sup>c</sup>	82182,02 <sup>b</sup>	96347,26 <sup>a</sup>
$\eta_2$ (Pa.s)	871176,88 <sup>d</sup>	1360900,00 <sup>c</sup>	2151520,00 <sup>b</sup>	2778380,00 <sup>a</sup>

<sup>1</sup>Médias com letras iguais, na mesma linha, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ).

\*\* FRV = Fator de Redução Volumétrica

O módulo elástico aumentou para todos os elementos do modelo generalizado de Maxwell com o aumento do FRV. Segundo Fox et al. (2000) a obtenção de altos valores para o módulo de elasticidade sugere que a matriz de caseína é elástica e contínua, apresentando fortes atrações moleculares. O aumento do FRV levou ao aumento das caseínas disponíveis para interagir, e a formação de um gel mais denso, resultando em queijos mais firmes e menos elásticos (Green et al., 1981; Guinee et al., 1996; Waungana, 1997).

O aumento dos valores de  $\eta_1$  e  $\eta_2$  ( $p > 0,05$ ) (Tabela 12) em função dos FRV 2,5, 3, 3,5, e 4, indicou que a viscosidade aumentou com o aumento do FRV.

Como esperado, os elementos de viscosidade do modelo generalizado de Maxwell demonstram que queijos obtidos a partir de retentados com maiores FRV, tendem a ser menos macios. Desta forma estes resultados podem estar associados à diminuição do teor de umidade

obtidos (Tabela 6). De acordo com Fox et al., (2000), as ligações caseína-água atuam como plasticizante e tornam a matriz menos elástica e mais suscetível a fraturas, enquanto que a água livre atua como lubrificante entre os agregados de caseína, o que resulta na redução da firmeza do queijo.

A Tabela 13 mostra os valores dos parâmetros  $a$  e  $b$  modelo linear proposto por Peleg (1979). O parâmetro  $a$ , que indica o valor assintótico a que a tensão se reduz durante a relaxação, e representa o módulo elástico residual (similarmente corresponde ao  $E_0$  no modelo de Maxwell) (Cunha, 2002).

**Tabela 13.** Valores dos parâmetros do modelo linear de Peleg.

Modelo de Peleg	Queijos			
	**FRV			
Parâmetros	2,5	3,0	3,5	4,0
$a$	1,00 <sup>1d</sup>	0,98 <sup>c</sup>	0,93 <sup>b</sup>	0,89 <sup>a</sup>
$b$ (s <sup>-1</sup> )	0,019 <sup>a</sup>	0,019 <sup>a</sup>	0,019 <sup>a</sup>	0,017 <sup>a</sup>

<sup>1</sup>Médias com letras iguais, na mesma linha, não diferem significativamente entre si ( $p>0,05$ ).

\*\* FRV = Fator de Redução Volumétrica

O parâmetro  $a$  (Tabela 13) foi influenciado pelos diferentes FRV usados para a fabricação dos queijos, mostrando que a elasticidade do produto diminuiu com o aumento do FRV ( $p<0,05$ ), enquanto o parâmetro  $b$  não apresentou diferença ( $p>0,05$ ) para os FRV empregados.

#### 4.6 ANÁLISE INSTRUMENTAL DO PERFIL DE TEXTURA (TPA)

A Tabela 14 mostra os resultados da análise instrumental do perfil de textura dos queijos produzidos a partir de diferentes FRV utilizados. O aumento do FRV contribuiu para a obtenção de queijos mais firmes e com maior elasticidade ( $p<0,05$ ). Segundo Hinrichs (2001) quando se

utilizam maiores valores de FRV na concentração do leite, aumenta a viscosidade do concentrado e este apresenta maior firmeza durante a coagulação. Este fato pode ser atribuído à maior concentração da caseína, albumina e globulina, disponíveis para formar a rede protéica. Segundo Guinee et al. (1996), Waungana et al. (1997) e Erdem (2000) tal comportamento poderia ser creditado à diminuição da distância de colisão entre as micelas de caseína quando empregados retentados, pois a hidrofobicidade das proteínas do leite diminui com o aumento do FRV, fazendo com que a agregação ocorra de forma mais rápida durante a coagulação.

Observou-se, também, um aumento nos valores da adesividade com o aumento do FRV, conforme mostrado na Tabela 14. Comportamento semelhante foi encontrado em trabalho realizado por Kealy (2006), que mostrou que para queijos cremosos, o aumento da adesividade das amostras também estava relacionado ao maior teor de gordura. Pode-se verificar na Tabela 7 que o aumento do FRV resultou em retentados com maiores teores de gordura e proteína (Tabela 6). Não houve diferenças entre a coesividade das amostras de queijos fabricados com estes valores de FRV.

**Tabela 14.** Parâmetros da análise instrumental do perfil de textura dos queijos fabricados a partir dos retentados de FRV 2,5, 3, 3,5 e 4.

Parâmetros	Queijos			
	**FRV			
	2,5	3,0	3,5	4,0
Firmeza (Pa)	1607,46 <sup>1d</sup>	2489,18 <sup>c</sup>	3224,48 <sup>b</sup>	4812,85 <sup>a</sup>
Coesividade	2578,31 <sup>a</sup>	2731,10 <sup>a</sup>	2699,27 <sup>a</sup>	2794,76 <sup>a</sup>
Elasticidade	6197,49 <sup>ac</sup>	6280,25 <sup>ac</sup>	6152,93 <sup>ab</sup>	6111,55 <sup>a</sup>
Adesividade (Pa.s)	- 22,28 <sup>d</sup>	- 95,48 <sup>c</sup>	- 200,52 <sup>b</sup>	- 308,73 <sup>a</sup>

<sup>1</sup>Médias com letras iguais, na mesma linha, não diferem significativamente entre si (p>0,05).

\*\*FRV = Fator de Redução Volumétrica

## 5 CONCLUSÕES

1. A partir dos concentrados com FRV iguais a 2,5; 3,0; 3,5 e 4,0, foi possível a fabricação de queijos tipo Minas Frescal coagulados diretamente na embalagem. Todos os queijos fabricados com esses concentrados apresentaram características que, se acredita, possam ser aceitas pelo mercado consumidor.
2. Em todos os ensaios realizados, o fluxo permeado médio decresceu quase linearmente com o aumento do FRV durante a ultrafiltração do leite.
3. Queijos fabricados com diferentes FRV apresentaram rendimento e características físico-químicas distintas. O uso de concentrados com maiores FRV resultou em queijos com maiores teores de sólidos totais (gordura, proteína e sais) e, conseqüentemente, com menores teores de umidade e menores rendimentos de fabricação e ajustado.
4. As medidas das propriedades de fluxo realizadas com os retentados mostraram que estes apresentaram comportamento Newtoniano, onde a viscosidade aparente aumentou significativamente com o aumento do FRV e diminuiu com o aumento da temperatura.
5. Nos concentrados observou-se boa correlação dos valores de energia de ativação encontrados com a relação de Arrhenius, verificando-se um aumento significativo destes valores com o aumento do FRV. Houve também boa correlação das curvas obtidas experimentalmente com o modelo generalizado de Maxwell com  $n=2$ .
6. O aumento do FRV contribuiu para a obtenção de queijos de textura firme, elástica e adesiva.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABIQ - Associação Brasileira das Indústrias de Queijo. Disponível em: <<http://www.abiq.com.br>>. Acesso em: 20 jun. 2006.
2. AGRIDATA – Sistema de Informações do Agronegócio de Minas Gerais. Tecnologia de fabricação do queijo: queijo Minas Frescal. Disponível em: <[http://www.agridata.mg.gov.br/pesquisas/tecnologia\\_queijo/patecfafrescal.htm](http://www.agridata.mg.gov.br/pesquisas/tecnologia_queijo/patecfafrescal.htm)> Acesso em: 20 jan. 2006.
3. ANEMA, S. G.; LEE, S. K.; KLOSTERMEYER, H. Effect of protein, nonprotein-soluble components, and lactose concentrations on the irreversible thermal denaturation of  $\beta$ -lactoglobulin and  $\alpha$ -lactalbumin in skim milk. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.54, p. 7339-7348, 2006.
4. ANTONIOU, K. D., PETRIDIS, D., RAPHAELIDES, S., OMAR, Z. B., & KESTELOOT, R. Texture assessment of French cheeses. **Journal Food Science**, v.65, p168–172, 2000.
5. AOAC. Association of Official Analytical Chemists. **Official methods of analysis of the AOAC International**. 14th ed. Washington, 1998.
6. ATRA, R.; VATAI, G.; BEKASSY-MOLNAR, E. E BALINT, A. Investigation of ultra- and nanofiltration for utilization of whey protein and lactose. **Journal of Food Engineering**, v.67, n.3, p.325-332, 2005.
7. BAUMAN, D. E.; MATHER, I. H.; WALL, R. J.; LOCK, A. L. Major advances associated with the biosynthesis of milk. **Journal Dairy Science**, v.89, p.1235–1243, 2006.



8. BÉGOIN, L.; RABILLER-BAUDRY, M.; CHAUFER, B.; HAUTOBOIS, MARIE-CHRISTINE e DONEVA, T. Ageing of PES industrial spiral-wound membranes in acid whey ultrafiltration. **Desalination**, v.192, n.1-3, p.25-39, 2006.
9. BEHMER, M. L. A. **Laticínios**. São Paulo: Edições Melhoramentos, 1998.
10. BEHMER, M. L. A. **Tecnologia do leite**. 15a ed. São Paulo: Nobel, 1991. 322p.
11. BHATTACHARYA, S. N. **Rheology: fundamentals and measurements**. Australia: Royal Melbourne Institute of Technology, 1997.
12. BIRD, R. B. **Transport phenomena**. New York : John Wiley, 1960.
13. BORSZCZ, V. **Implantação do sistema APPCC para sorvetes: aplicação na empresa Kimyto**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
14. BOURNE, M. **Food texture and viscosity: concept and measurement**. 2ª ed. Academic Press – an Elsevier Science Imprint, 2002. 427p.
15. BOWEN, W. R.; DONEVA, T. A.; STOTON, J. A. G. Protein deposition during cross-flow membrane filtration: AFM studies and flux loss. **Colloids Surfaces B: Biointerf.**, v.27, p.103, 2002.
16. BRANS, G.; SCHROËN, C. G. P. H.; VAN DER SMAN, R. G. M. E BOOM, R. M. Membrane fractionation of milk: state of the art and challenges. **Journal of Membrane Science**, v.243, n.1-2, p.263-272, 2004.
17. BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento Portaria nº 352, de 04 de setembro de 1997. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF. Disponível em: <http://www.anvisa.gov.br> Acesso em: 05 de fev. de 2005.
18. CAMPOS, A. C. **Efeito do uso combinado de ácido láctico com diferentes proporções de fermento láctico mesofílico no rendimento, proteólise, qualidade microbiológica e propriedades mecânicas do queijo Minas frescal**. Campinas, 2000. 80p. Dissertação

- (Mestre em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
19. CARVALHO, J. D. G.; VIOTTO, W.H.; KUAYE, A. Y. The quality of Minas Frescal cheese produced by different technological processes. **Food Control**. v.18, n.3, p.262-267, 2007.
  20. CHAN, R.; CHEN V. Characterization of protein fouling on membranes: opportunities and challenges. **Journal of Membrane Science**, v.242, n.1-2, p.169-188, 2004.
  21. CHENG, T. W.; LIN, CHIH-TA. A study on cross-flow ultrafiltration with various membrane orientations. **Separation and Purification Technology**, v.39, n.1-2, p.13-22, 2004.
  22. CHERYAN, M. **Ultrafiltration and Microfiltration: Handbook**. Lancaster, Technomatic Publ. Co., USA, 1998.
  23. CHATTERTON, D. E. W.; SMITHERS, G.; ROUPAS, P.; BRODKORB, A. Bioactivity of b-lactoglobulin and a-lactalbumin—Technological implications for processing. **International Dairy Journal**, V.15, P.1229-1240, 2006.
  24. CHERYAN, M. **Ultrafiltration Handbook**. Technomic, Lancaster, PA, 1986.
  25. CUNHA, C. R. **Efeito do uso de retentados de baixo fator de concentração no rendimento, proteólise e propriedades viscoelásticas de queijo Minas Frescal de reduzido teor de gordura**. Campinas, 2002. 118p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
  26. CUNHA, C. R.; VIOTTO, L. A.; VIOTTO, W. H. Use of low concentration factor ultrafiltration retentates in reduced-fat Minas Frescal cheese manufacture: effect on yield and sensory properties. **International Journal of Dairy Technology**. v.57,n.4, 2004.

27. CUNHA, R. L. **A reologia e a funcionalidade dos ingredientes**. Trabalho apresentado no “WORKSHOP” REOLOGIA EM PRODUTOS ALIMENTÍCIOS, Campinas, 1999. Não publicado.
28. DAUFIN, G.; ESCUDIER, J. P.; CARRÈRE, H.; BÉROT, S.; FILLAUDEAU, L.; DECLoux, M. Recent and emerging applications of membrane processing in the food and dairy industry **Food and Bioproducts Processing**, v.79, n.C2, p.89-102, 2001.
29. DE BOER, R.; HIDDINK, J. Membrane processes in dairy industry. State of the art. **Desalination**. v.35, 1980.
30. ERDEM, Y. K. Influence of ultrafiltration on modification of surface hydrophobic sites of milk protein system in the course of renneting. **Journal of Food Engineering**. v.44, p.63-70, 2000.
31. ERDEM, Y. K. Modification of casein micelle structure caused by ultrafiltration and heat treatment: A spectrofluorimetric and kinetic approach. **Journal of Food Engineering**. v.74, p.536-541, 2006.
32. FARKYE, N. Y. Cheese technology. **International Journal of Dairy Technology**.v.57, n.2-3, p.91-98, 2004.
33. FELÍCIO FILHO, A. Eficiência econômica de estocagem de queijos. **Informe Agropecuário**, v.10, n.21, p.6-11, 1984.
34. FENAILLE, F.; PARISOD, V.; VISANI, P.; POPULAIRE, S. ; TABET, J. C. ; GUY, P. A. Modifications of milk constituents during processing: A preliminary benchmarking study. **International Dairy Journal**, v. 16, p.728–739, 2006.
35. FENNEMA, O. R. **Química de los alimentos**. 2. ed. Zaragoza: Acribia, 2000.
36. FEUERPEIL, H. P., Superior ceramic membrane technology in food industry. **Fruit Process**. v.3, n.366, 1993.

37. FOEGEDING, E. A.; BROWN, J.; DRAKE, M. A.; DAUBERT, C. R. Sensory and mechanical aspects of cheese texture. **International Dairy Journal**, v.13, p.585–591, 2003.
38. FOX, P. F.; GUINEE, T. P.; COGAN, T. M.; McSWEENEY, P. L. H. Cheese Rheology and Texture. In: FOX, P. F.; GUINEE, T. P.; COGAN, T. M.; McSWEENEY, P. L. H. **Fundamentals of Cheese Science**. Gaithersburg: Aspen, 2000.
39. FURTADO, M. M. **A arte e a ciência do queijo**. São Paulo: Globo Comunicações, 1991. 297p.
40. FURTADO, M. M.; LOURENÇO NETO, J. P. M. Queijo Minas Frescal. In: **Tecnologia de Queijos**. 1ª Edição. 1994. p.73-75.
41. FURTADO, M. M.; SOUZA, H. M. de; MUNCK, A. V. A fabricação do queijo Minas Frescal sem o emprego de culturas lácticas. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**, v.35, n.207, p.15-21, jan/fev. 1980a.
42. FURTADO, M. M.; WOLFSCHOON-POMBO, A. F.; MUNCK, A. V.; SOUZA, H. M. de. Estudo conclusivo à respeito da fabricação do queijo Minas Frescal por diferentes processos. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**, v.35, n.208, p.13-16, mar/abr., 1980b.
43. GEA FILTRATION. **Filtração por membranas**: osmose reversa, nanofiltração, ultrafiltração e microfiltração. Disponível em: <<http://www.geafiltration.com>>. Acesso em: 08 jun 2005.
44. GIBSON, R. L., Cross flow membrane technology for the wine industry, **Australian Grapegrower and Winemaker**, v.268, n.17, 1986.
45. GIESE, J. Measuring physical properties of food. **Food Technology**, v.19, p.54-63, 1995.

46. GIRARD, B., FUKUMOTO, L. R. Membrane processing of fruit juices and beverages: a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. v.40, n.2, p.91-157, 2000.
47. GOOSEN, M. F. A.; SABLANI, S. S.; AL-HINAI, H.; AL-OBEIDANI, S.; AL-BELUSHI, R. E JACKSON, D. Colmatagem of reverse osmosis and ultrafiltration membranes: a critical review. **Separation Science and Technology**, v.39, n.10, p.2261–2297, 2004.
48. GUINARD, J. X., MAZZUCHELLI, R. The sensory perception of texture and mouthfeel. **Trends in Food Science and Technology**, v.7, p.213–219, 1996.
49. GUINEE, T. P.; CALLAGHAN, D. J.; PUDJA, P. D.; O'BRIEN, N. O. Rennet coagulation properties of retentates obtained by ultrafiltration of skim milks heated to different temperatures. **International Dairy Journal**, v.6, p.581-596, 1996.
50. HANHUI, Z.; JINGJING, Z.; DINGTI, L. e XIAOBIN, L. Reducing concentration polarization in hollow-fiber membranes. **Membrane Technology**, v.2004, n.9, p. 5-9, 2004.
51. HINRICHS, J. Incorporation of whey proteins in cheese. **International Dairy Journal**, n.11, p.495–503, 2001.
52. HYDAMAKA, A. W.; WILBEY, R. A.; LEWIS, M. J.; KUO, A. W. Manufacture of heat and acid coagulated cheese from ultrafiltered milk retentates. **Food Research International**, v.34, p.197-205, 2001.
53. ISO. Sensory Analysis – Vocabulary. **International Organization for Standardization**, ISO5492:1992, 1992.
54. JAMES, B. J.; JING, Y.; CHEN, X. D. Membrane colmatagem during filtration of milk – a microstructural study. **Journal of Food Engineering**, v.60, p.431, 2003.

55. KEALY, T. Application of liquid and solid rheological technologies to the textural characterisation of semi-solid foods. **Food Research International**, v.39, p.265–276, 2006.
56. KESSLER, H. G. **Food and bioprocess engineering, dairy technology**. München: Verlag A. Kessler, p 56–96, 2002.
57. KOCH MEMBRANE SYSTEMS. Disponível em: <<http://www.kochmembrane.com>>  
Acesso em: 12 jan. 2004.
58. KOSIKOWSKI, F. New cheese-making procedures utilizing ultrafiltration. **Food Technology**. Chicago, v.40, n.6, p.71-77, 1986.
59. LAWRENCE, R. C. **The use of ultrafiltration technology in cheese-making**. Brussels, Bélgica: IDF Bulletin, 1989.
60. LEWIS, M. J. **Propriedades físicas dos alimentos y de los sistemas de processado**. 1ª Edição. Acribia: Zaragoza, 1993
61. LUCEY, J. A. Cultured dairy products: an overview of their gelation and texture properties. **International Journal of Dairy Technology**, v.57, n.2/3, 2004.
62. MAIJALA, K. Cow milk and human development and well-being. **Livestock Production Science**, v.65, p.1-18, 2000.
63. MAKARDIJ, A.; CHEN, X. D.; FARID, M. M. Microfiltration and ultrafiltration of milk: some aspects of colmatagem and cleaning. **Trans. IChemE**, v.77, p.107, 1999.
64. MAUBOIS, J. L. New applications of membrane technology in the dairy industry. **The Australian Journal of Dairy Technology**. Victoria, v.46, n.2, p.91-95, 1991.
65. MAUBOIS, J. L.; MOCQUOT, G. Application of membrane ultrafiltration to preparation of various types of cheeses. **Journal of Dairy Science**, v.58, n.7, p.1001–1007, 1975.

66. MEHAIA, M. A. Manufacture of fresh white cheese (Domiaty-type) from ultrafiltered goats' milk. **Food Chemistry**, v.79, p.445-452, 2002.
67. MORESI, M.; LO PRESTI, S. Present and potential applications of membrane processing in the food industry. **Italian Journal of Food Science**, v.15, n.1, 3-34, 2003.
68. MORTENSEN, H. MD Foods do Brasil—A threshold to South America. **Scandinavian Dairy Information**. v.6, p.26–27, 1992.
69. MUN, D. M.; HSIEH, T.-T; TIU, C. Steady shear viscosity of ultrafiltered whole and skim milk retentate before and during fermentation. **Journal of Texture Studies**, v.30, p.549-561, 1999.
70. MUTHUKUMARAN, S.; KENTISH, S. E.; ASHOKKUMAR M.; STEVENS, G. W. Mechanisms for the ultrasonic enhancement of dairy whey ultrafiltration **Journal of Membrane Science**, v.258, n.1-2, p.106-114, 2005.
71. NWUHA, V. O. Influence of cleansers on a polysulphone membrane used for milk ultrafiltration. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 31, n.1, p.27-36, 1996.
72. OLIVEIRA, J. S. **Queijo: fundamentos tecnológicos**. 2ª Edição. São Paulo: Editora Unicamp, 1986. 146p.
73. ORDÓÑEZ, J. A.; DÍAZ, O.; COBOS, A.; HOZ, L. **Tecnología de alimentos – Alimentos de origem animal**. Vol. 2. Tradução: Fátima Murad. Porto Alegre: Artmed, 2005.
74. ORIGINLAB. **Origin Pro**® 7.5 SR2 versão 7.5817, 2003.
75. PAULSON, D. J., WILSON, R. L.; SPATZ, D. D., Crossflow membrane technology and its applications, **Food Technology**, v.38 (12),n.77, 1984.

76. PELEG, M. Characterization of the stress relaxation curves of solid foods. **Journal of Food Science**, v. 44, n. 1, p. 277-281, 1979.
77. PELEG, M. Linearization of relaxation and creep curves of solid biological materials. **Journal of Rheology**, v. 24, n. 4, p. 451-463, 1980.
78. PERESI, J. T. M.; GRACIANO, R. A. S.; ALMEIDA, I. A. Z. C. de; LIMA, S. I. de; RIBEIRO, A. K.; CARVALHO, I. S. de; LIMA, M. de. Queijo Minas tipo Frescal artesanal e industrial. Qualidade microscópica, microbiológica e teste de sensibilidade aos agentes antimicrobianos. **Revista Higiene Alimentar**. São Paulo, v.15, n.83, p.63-70, 2001.
79. PINTO, P. S. A.; GERMANO, M. I. S.; GERMANO, P. M. L. Queijo minas: problema emergente de vigilância sanitária. **Revista Higiene Alimentar**. São Paulo, v.10, n.44, p.22-27, 1996.
80. PRENTICE, J. H., LANGLEY, K. R., MARSHALL, R. J. **Cheese Rheology**. In Cheese: Chemistry Physics and Microbiology, 2<sup>a</sup> Ed. P.F. Fox (Ed.) Chapman & Hall, New York, 1993.
81. PUHAN, Z. Dairy technology on the turn of the millennium. **Zb. Biotehniške fak**, v.76, n.2, 2000.
82. RAO, M. A.; STEFFE, J. F. **Viscoelastic properties of solid foods**. London; New York: Elsevier Applied Science, 1992.
83. RAVAZI, M.A; MORTAZAVI, A.; MOUSAVI, M. Dynamic modeling of milk ultrafiltration by artificial neural network. **Journal of Membrane Science**, v.220, p.47-58, 2003.
84. REINER, M. **Advanced Rheology**. H. K. Lewis & Co. Ltd., London, 1971.



85. ROMBAUT, R.; DEWETTINCK, K. Properties, analysis and purification of milk polar lipid. **International Dairy Journal**, v.16, p.1362–1373, 2006.
86. SHOEMAKER, C. F., NANTZ, J., BONNANS, S., & NOBLE, A. Rheological characterization of dairy products. **Food Technology**, v.46, p.98–104, 1992.
87. SILVA, I. M. M.; ALMEIDA, R. C. C.; ALVES, M. A. O.; ALMEIDA, P. F. Occurrence of *Listeria* spp. in critical control points and the environment of Minas Frescal cheese processing. **International Journal of Food Microbiology**, v.81, p.241-48, 2003.
88. SMIT, G. **Dairy Processing – Improving quality**. Cambridge:Woodhead, 2003.
89. SONDHI, R.; BHAVE, R.; JUNG, G. Applications and benefits of ceramic membranes. **Membrane Technology**, v.2003, n.11, p.5-8, 2003.
90. SPREER, E. **Lactologia industrial**. Zaragoza: Acribia, 1991.
91. SRIKANTH, G. Membrane separation processes: technology and business opportunities. **Chemical Engineering World**, v.34, n.5, p.55-66, 1999.
92. STATSOFT Inc. **Statistica® for windows**. Versão 6.0. Tulsa, OK, 2001.
93. SZCZESNIAK, A. S. Classification of textural characteristics. **Food Science**, v.28, p.385–389, 1963b.
94. SZCZESNIAK, A. S. Objective measurement of food texture. **Food Science**, v.28, p.410–420, 1963a.
95. TABILIO-MUNIZAGA, G.; BARBOSA-CANOVÁS, G. V. Rheology for the food industry. **Journal of Food Engineering**, v. 67, p.147-156, 2005.
96. THOMÄ-WORRINGER, C.; SØRENSEN, J.; LÓPEZ-FANDIÑO, R. Health effects and technological features of caseinomacropeptide. **International Dairy Journal**, v.16, p.1324-1333, 2006.

97. TUNICK, M. H. Symposium: Dairy products rheology – Rheology of dairy foods that gel, stretch, and fracture. **Journal of Dairy Science**, v.83, p.1892-1898, 2000.
98. VAN DENDER, A. **Contribuição ao estudo do uso da ultrafiltração de leite na fabricação de queijo Minas Frescal**. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos UNICAMP, Campinas, 1995.
99. VARNAN, A. H.; SUTHERLAND, J. P. **Leche y productos lácteos**. Zaragoza: Acribia, 1994.
100. VÉLEZ-RUIZ, J. F. & BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Rheological properties of selected dairy products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v.37, n.4, p.311-359, 1997.
101. VÉLEZ-RUIZ, J. F. & BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Rheological properties of concentrated milk as a function of concentration, temperature and storage time. **Journal of Food Engineering**, v.35, p.177-190, 1998.
102. VIEIRA, S. D. A.; NETO, J. P. M. Elaboração de queijos frescos em pequena escala. **Informe Agropecuário**, v.8, n.88, p.28-29, 1982.
103. VISSER, J. Factors affecting the rheological and fracture properties of hard and semi-hard cheese. In P. Walstra, & T. van Vliet (Eds.), **Bulletin of the International Dairy Federation** No. 268 (p.49–61), 1991.
104. WALSTRA, P.; JENNESS, R. **Dairy Chemistry and Physics**. New York: John Wiley & Sons, 1984.
105. WAUNGANA, A.; SINGH, H.; BENNETT, R. J. Influence of denaturation and aggregation of  $\beta$ -lactoglobulin on rennet coagulation properties of skim milk and ultrafiltered milk. **Food Research International**, v.29, p.715-721, 1997.

106. WENDIN, K.; LANGTON, M.; CAOUS, L.; HALL, C. Dynamic analyses of sensory and microstructural properties of cream cheese. **Food Chemistry**, v.71, p.363–378, 2000.