

**ELISÂNGELA MENDONÇA**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE  
IOGURTES COMERCIAIS**

**FLORIANÓPOLIS, JUNHO DE 2002**

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

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE**  
**IOGURTES COMERCIAIS**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de mestre em Engenharia de Alimentos.

**ORIENTADOR: Prof. Dr. José Antonio Ribeiro Souza**

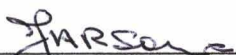
**Elisângela Mendonça**

**FLORIANÓPOLIS, JUNHO DE 2002**

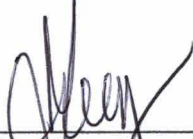
# Estudo do Comportamento Reológico de Iogurtes Comerciais

**Elisângela Mendonça**

Dissertação julgada para obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Alimentos**, área de **Desenvolvimento de Processos da Indústria de Alimentos**, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina.

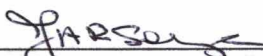


Prof. Dr. José Antonio Ribeiro de Souza  
Orientador



Prof. Dr. João Borges Laurindo  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação  
em Engenharia de Alimentos

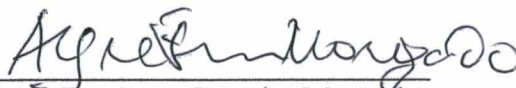
## Banca Examinadora:



Prof. Dr. José Antonio Ribeiro de Souza



Prof. Dr. João Borges Laurindo



Prof. Dr. Ayres Ferreira Morgado

**Florianópolis, 05 de junho de 2002**

*Com carinho e muita gratidão aos meus  
pais Genésio e Maria Alice,  
minha irmã Daniela, meu irmão Rodrigo e  
ao Miguel.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Ao meu orientador, Prof. José Antonio R. de Souza, por sua orientação, dedicação e apoio.

Ao Departamento de Engenharia Química e de Engenharia de Alimentos, pelo apoio e conhecimento transmitido.

Ao amigo Daniel, por esta sempre pronto a auxiliar frente a coordenadoria de pós-graduação de Engenharia de Alimentos.

Aos colegas do PROFI, pela grata convivência, em especial ao Fábio, Kátia, Bruno e Sabrina.

À minha turma de mestrado, pelo apoio nas dificuldades, pelo respeito, compreensão e carinho.

Ao colega Vagner pelo auxílio.

A todas as pessoas que de alguma forma tenham acompanhado e contribuído para a realização deste trabalho.

Aos tantos amigos queridos que sempre me incentivaram, em especial a Ermínia, Maria Auxiliadora, aos meus irmãos Rodrigo e Daniela.

Ao querido Miguel.

Aos meus pais, Genésio e Maria Alice, que sempre estiveram ao meu lado, acreditando, apoiando e acima de tudo torcendo pelo meu sucesso.

À Deus pela oportunidade dessa existência.

## ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	X
RESUMO.....	Xii
ABSTRACT.....	Xiii
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	05
2.1 Estudos Reológicos.....	05
2.1.1 Lei da Viscosidade de Newton.....	06
2.1.2 Fluidos Newtonianos.....	08
2.1.3 Fluidos Não-Newtonianos.....	08
2.2 Modelos Reológicos.....	11
2.2.1 Modelo de Ostwald-de Waele.....	12
2.2.2 Modelo de Casson.....	13
2.2.3 Modelo de Herschel-Bulkley.....	14
2.2.4 Modelo de Weltman.....	14
2.2.5 Modelo de Hahn.....	15
2.2.6 Modelo de De Kee, Code.....	15
2.2.7 Modelo de Cross.....	16
2.3 Medidas Reológicas.....	16
2.3.1 Reômetro Capilar.....	17
2.3.2 Sistemas Rotacionais.....	18
2.3.2.1 Reômetro Rotacional de Cilindros Concêntricos.....	19
2.3.2.2 Reômetro Rotacional de Cone e Placa.....	23
2.3.2.3 Reômetro Rotacionais de Placas Paralelas.....	23
2.4 Comportamento Reológico do logurte.....	24
2.4.1 Tixotropia.....	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1 Amostra Utilizadas.....	30
3.2 Reômetro.....	32
3.3 Operações com o Reômetro.....	34
3.4 Medidas.....	35
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	36
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	54
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	56
7. ANEXOS.....	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Escoamento de um fluido entre duas placas paralelas.....	7
Figura 2.2.	Curvas de escoamento para vários fluidos independentes do tempo....	9
Figura 2.3.	Curvas de escoamento para fluidos dependentes do tempo.....	10
Figura 2.4.	Classificação geral dos fluidos.....	11
Figura 2.5.	Viscosímetro Cannon-Fenske .....	18
Figura 2.6.	Reômetro Rotacional tipo Searle.....	20
Figura 2.7.	Reômetro Rotacional.....	20
Figura 2.8.	Diferentes tipos de Histerese.....	28
Figura 3.1.	Viscosímetro de Cilindros Concêntricos.....	32
Figura 3.2.	Esquema do sistema de Cilindros Concêntricos.....	34
Figura 4.1.	Relação entre taxa de deformação e a tensão de cisalhamento para verificação da tixotropia nas amostras A e B.....	37
Figura 4.2.	Relação entre taxa de deformação e a tensão de cisalhamento para verificação da tixotropia nas amostras C e D.....	38
Figura 4.3.	Relação entre taxa de deformação e a tensão de cisalhamento para verificação da tixotropia nas amostras E e F.....	39
Figura 4.4.	Relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento para amostra F, após 80 minutos de cisalhamento.....	40
Figura 4.5.	Confronto dos dados teóricos obtidos através do modelo lei da potência com os dados experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para amostra A.....	42
Figura 4.6.	Confronto dos dados teóricos obtidos através do modelo lei da potência com os dados experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para amostra B.....	43
Figura 4.7.	Confronto dos dados teóricos obtidos através do modelo lei da potência com os dados experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para amostra C.....	43

Figura 4.8.	Confronto dos dados teóricos obtidos através do modelo lei da potência com os dados experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para amostra D.....	44
Figura 4.9.	Confronto dos dados teóricos obtidos através do modelo lei da potência com os dados experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para amostra E.....	44
Figura 4.10.	Confronto dos dados teóricos obtidos através do modelo lei da potência com os dados experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para amostra F.....	45
Figura 4.11.	Viscosidade aparente da amostra A, para diferentes taxas de deformação.....	46
Figura 4.12.	Viscosidade aparente da amostra B, para diferentes taxas de deformação.....	46
Figura 4.13.	Viscosidade aparente da amostra C, para diferentes taxas de deformação.....	47
Figura 4.14.	Viscosidade aparente da amostra D, para diferentes taxas de deformação.....	47
Figura 4.15.	Viscosidade aparente da amostra E, para diferentes taxas de deformação.....	48
Figura 4.16.	Viscosidade aparente da amostra F, para diferentes taxas de deformação.....	48
Figura 4.17.	Determinação da tensão de cisalhamento em diferentes taxas de deformação para amostra C.....	49
Figura 4.18.	Determinação da tensão de cisalhamento em diferentes taxas de deformação para amostra D.....	50
Figura 4.19.	Determinação da tensão de cisalhamento em diferentes taxas de deformação para amostra E.....	50
Figura 4.20.	Determinação da tensão de cisalhamento em diferentes taxas de deformação para amostra F.....	51



**LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1.	Descrição da composição das amostras de iogurte. Valor nutritivo aproximado para 100g de produto.....	31
Tabela 4.1.	Parâmetros do modelo da lei da potência para todas as amostras analisadas.....	41
Tabela 4.2.	Parâmetros do modelo de Weltmas para as amostras C, D, E e F.....	52

## LISTA DE SÍMBOLOS

A1	Tensão no início do cisalhamento do modelo de Weltman
A2	Tensão no início do cisalhamento do modelo de Hahn
B1	Coefficiente de ruptura tixotrópica do modelo de Weltman
B2	Coefficiente de ruptura tixotrópica do modelo de Hahn
D	Diâmetro do tubo
h	Altura do cilindro
K	Índice de consistência
k'	Constante da reta
$k_{oc}$	Tensão inicial de Casson
$k_{cy}$	Viscosidade plástica de Casson
k2	Constante da equação de Cross
L	Comprimento do tubo
M	Torque
m	Constante dimensional da equação de Cross
n	Índice de comportamento do escoamento
P	Ordem da reação
Q	Vazão volumétrica
R1	Cilindro interno
R2	Cilindro externo
t	Tempo
$v_x$	Velocidade na direção x

$\Delta p$	Queda de pressão ao longo de L
$\gamma$	Taxa de deformação
$\eta$	Viscosidade aparente
$\eta_0$	Limite da viscosidade para taxa de deformação zero na equação de Cross
$\eta_\infty$	Limite da viscosidade para taxa de deformação infinita na equação de Cross
$\lambda$	Parâmetro estrutural
$\mu$	Viscosidade absoluta
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$\omega$	Velocidade angular
$\tau_e$	Tensão de equilíbrio do modelo de Hahn

## RESUMO

O conhecimento de propriedades reológicas é de grande importância no processamento, manuseio, controle de qualidade e desenvolvimento de produtos alimentícios. Muitos alimentos apresentam comportamento não-newtoniano, onde a sua viscosidade pode variar com o tempo, além de ser função das condições de escoamento. Este é o caso do iogurte que apresenta uma estrutura em gel bastante complexa. Neste trabalho é feita a caracterização reológica de iogurtes comerciais, de diferentes marcas, sendo estudados produtos naturais, integrais e desnatados. Os estudos foram realizados em um reômetro de cilindros concêntricos, à temperatura de 6°C, com taxas de deformação entre 0,02 s<sup>-1</sup> e 524,88 s<sup>-1</sup>. Dados experimentais foram obtidos procurando-se analisar o comportamento da tensão de cisalhamento em função do tempo, sob a ação de diferentes taxas de deformação 58,33 s<sup>-1</sup>, 174,96 s<sup>-1</sup> e 524,88 s<sup>-1</sup>, tanto para o produto integral quanto para o desnatado. Foram determinadas também as curvas de tixotropia para todas as amostras analisadas (integral e desnatado). O decaimento da tensão de cisalhamento com o tempo foi representado pelo modelo de Weltman,  $\tau = A_1 - B_1 \ln t$ , que apresenta parâmetros representando a tensão no início do cisalhamento e a queda estrutural do produto. Quando o fluido sofreu cisalhamento por um período de tempo suficientemente longo, a sua viscosidade se aproximou de uma viscosidade de equilíbrio, sendo esta condição obtida no tempo de aproximadamente 60 minutos. As curvas ascendente e descendente da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação foram representadas pelo modelo da lei da potência (Ostwald-de Waele), que é independente do tempo, tendo os iogurtes apresentado o comportamento pseudoplástico, já relatado na literatura.

## **ABSTRACT**

The rheological property knowledge is of great importance in food product procedure, handling, quality control and development. Many foods present a non-Newtonian behavior, where its viscosity can range over time, besides of being the flowing condition functions. This is the yogurt case that presents a structure in gel very complex. In this work is done a rheological characterization of commercial yogurt, of different marks, being studied integral natural products and skim milk. The studies were held in a concentric cylinder rheometer, in temperature of 6° C, with deformation taxes between 0,02 s<sup>-1</sup> and 524,88 s<sup>-1</sup>. Experiment data were obtained seeking to analyze the shear tension behavior in relation to time, over the different deformation taxes action 58,33 s<sup>-1</sup> and 524,88 s<sup>-1</sup>, for both integral and skim product. It was also determinate the thixotropy curves for both conditions (integral and skim). The shear tension dropping over the time was represented by Weltman model,  $\tau = A1 - B1 \ln t$ , that presents parameters representing the tension in the beginning of the shear and the product structural dropping. When the fluid suffers shear for a time sufficiently long, its viscosity got near to an equilibrium viscosity, being this a condition obtained in a time of 60 min. The ascendant and descendant curves of shear tension due to deformation tax were represented by the power-law model (Oswald-de Waele), that is independent of time, having the yogurt presented the pseudo-plastic behavior, already reported in the literature.

## 1-INTRODUÇÃO

O leite fresco acidifica-se após algum tempo e esta propriedade tem sido utilizada pelo homem desde o princípio dos tempos para evitar o desenvolvimento de bactérias nocivas ao leite. O leite se acidifica deliberadamente mediante a adição de bactérias inócuas que produzem ácido e deste modo controlam o crescimento de outras bactérias que poderiam ser prejudiciais. Introduzindo certos microorganismos, controlando seu crescimento e atividade mediante regularização da temperatura do leite, se pode preparar uma grande variedade de leites ácidos ou fermentados de forma saudável (PORTER, 1981).

Os leites fermentados são consumidos desde a mais remota antigüidade, especialmente por povos orientais. Entre os leites fermentados está o iogurte, alimento corrente e popular, de grande digestibilidade. Nos países ocidentais o uso de leites fermentados aumentou no começo do século XX, momento em que Metchnikoff (PORTER, 1981) publicou seus trabalhos sobre as causas do envelhecimento, atribuindo às putrefações intestinais um importante papel. O iogurte se beneficiou dessa idéia e alcançou uma grande difusão (VEISSEYRE, 1972), segundo Metchnikoff os microorganismos presentes no iogurte exercem uma atividade benéfica sobre a flora intestinal.

O valor nutritivo do iogurte está relacionado com o leite que se utiliza. O iogurte é uma rica fonte de minerais, como fósforo, cálcio e potássio, além de vitaminas, proteínas, glicídios, gorduras e outros. Quando comparada a composição do iogurte natural e do leite do qual foi preparado o iogurte, observa-se que o iogurte contém mais proteínas, tiamina e riboflavina que o leite, porém menos vitamina A. Há pouca diferença em relação aos outros nutrientes (PORTER, 1981).

Nos últimos anos, estudos tem sido conduzidos para relacionar as propriedades terapêuticas do iogurte. Apesar de existir uma ampla literatura sobre o assunto, é difícil comprovar cientificamente essa evidência, como a prevenção do câncer ou diminuição do colesterol pelo consumo habitual do iogurte. Em contrapartida, as proteínas do leite, caseína, lactoalbumina e lactoglobulina são proteínas de alto valor biológico e portanto o consumo de iogurte providencia, principalmente para as pessoas com dieta pobre em carnes, alguns dos aminoácidos essenciais. Um outro benefício em consumir iogurte é seu alto conteúdo de cálcio e fósforo. A combinação desses minerais no leite e iogurte aumenta sua

biodisponibilidade, tornando-o importante para crianças e gestantes. Para pessoas que tem pouca enzima lactase no organismo, que é responsável pela quebra do açúcar do leite (lactose), o iogurte transforma a lactose em ácido láctico, facilitando a digestão e diminuindo a intolerância ao leite (ARRUDA, 1976).

O iogurte é um leite que, devido ao desenvolvimento dos microorganismos (*Lactobacillus delbrueckii ssp. Bulgaricus* e *Lactococcus salivarius ssp. Thermophilus*), tem uma determinada característica e sabor. Esses microorganismos suportam meios ácidos (pH de 4 a 4,5) e vivem em simbiose. O *Lactobacillus delbrueckii ssp. Bulgaricus* favorece o desenvolvimento do *Lactococcus salivarius ssp. Thermophilus* e ambos são responsáveis por transformar a lactose do leite em ácido láctico. O *Lactobacillus delbrueckii ssp. Bulgaricus* é o principal responsável pela formação do acetaldeído, composto importante à produção do aroma e sabor.

No Brasil desde 1970 o iogurte é um dos produtos lácteos fermentados que gozam de maior popularidade e que mais se consome, aumentando também sua importância econômica.

Do iogurte clássico se tem derivado uma grande variedade de produtos, que são também denominados iogurtes, mas muito diferentes do original. Assim temos desde os iogurtes batidos para beber com múltiplos ingredientes adicionados e de maior conservação, até os derivados de iogurtes enriquecidos com proteínas ou com lactose hidrolizada. Combinações das típicas bactérias acidificantes que contenham, por exemplo, *Bifidobacterium bifidun*, tem levado a elaboração de produtos como o "bioiogurte" e outros (SPREER, 1991). O desenvolvimento desses novos produtos aumentam o valor agregado do produto final.

O iogurte é ácido e tem uma fina e suave textura, que vai desde um gel firme até um líquido viscoso, dependendo da técnica de fabricação. Através de sua consistência, se diferencia produtos firmes, batidos, cremosos e produtos líquidos para beber. No decorrer da acidificação, onde a lactose se transforma em ácido láctico, o pH varia de 4 a 5 e a caseína coagula, resultando numa estrutura de gel protéico. A adição de leite em pó para aumentar a substância seca do produto melhora a formação do gel (BELITZ, 1992).

A variação da viscosidade e a expulsão do soro (sinerese) no iogurte são defeitos que levam o consumidor a contestar a qualidade organoléptica do produto, diminuindo seu consumo (OZER, 1997).

Os métodos de fabricação do iogurte variam consideravelmente, dependendo do tipo de produto que está sendo produzido e das matérias-primas que estão sendo utilizadas na formulação do produto, mas existe alguns princípios comuns que determina a natureza e a qualidade do produto final. Entre esses está o aumento de sólidos do leite, o tratamento térmico do leite, a inoculação do leite tratado termicamente com a cultura bacteriana, a incubação do leite inoculado, o resfriamento do coágulo, o empacotamento e a estocagem a frio (AFONSO, 1999).

Para a definição dos processos de industrialização é indispensável o conhecimento das propriedades físicas e químicas do produto. Dentre essas propriedades o comportamento reológico ocupa posição de destaque, sendo útil não só como medida de qualidade, mas também em projetos, avaliação e operação dos equipamentos processadores de alimentos tais como as bombas, sistemas de agitação, tubulação, etc (BEZERRA, 2000).

Estudos tem sido feitos sobre as características de alimentos fluidos incluindo aqueles com consistência pastosa. É conhecido o fato de que gêneros alimentícios raramente obedecem o modelo reológico simples de Newton, no qual existe uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, onde é possível caracterizar o modelo do fluxo com uma única constante, a viscosidade, que é uma propriedade física do material (CHHINNAN, 1985). Para caracterizar o fluido não-newtoniano, são necessários outros parâmetros (como taxa de deformação, tensão de cisalhamento, viscoelasticidade, dependência do tempo) e modelos mais complexos são necessários. As medidas reológicas podem ser melhoradas pelo conhecimento prévio do cisalhamento e da história térmica da amostra (BENEZECH, 1994).

A indústria brasileira tem crescido bastante no mercado mundial, mas ainda há muitas fronteiras a serem conquistadas, envolvendo todas as etapas tecnológicas. O sucesso de cada operação é importante para aumentar a qualidade do produto final; é necessário que as indústrias invistam em pesquisas nas diversas áreas que atuam.

O Brasil, por exemplo, é um grande exportador de frutas tropicais, produto que proporcionaria maior lucro para os exportadores se houvesse menor perda, decorrente de defeitos de aparência. Uma maneira de amenizar esses problemas é processando os frutos para exportar seus derivados na forma de sucos, néctares, sorvetes, sobremesas e outros. Para a fabricação desses produtos na indústria utiliza-se a polpa de fruta, a qual é submetida aos processos de industrialização.



Para a definição dos processos é necessário conhecer as propriedades físicas e químicas da fruta. A inexistência de dados reológicos sobre frutas tropicais nacionais que apresentam características diferentes daquelas de outros países, tem levado algumas indústrias a se preocupar em estudar o comportamento de determinado suco para projetar novas unidades de processamento. Este conhecimento é indispensável aos projetos de tubulações e dimensionamentos de bombas e aos sistemas de agitação e misturas, que precedem a chegada dos sucos concentrados às prateleiras dos supermercados.

Alguns resultados desses estudos já podem ser lidos em artigos, como a polpa de manga que foi caracterizada como um líquido pseudoplástico, sensível à temperatura e que apresenta comportamento tixotrópico.

O Brasil também é um grande produtor de leite. Por esse motivo é muito importante para os produtores aumentar o valor agregado do leite. Uma maneira é investir em seus subprodutos e o iogurte é o subproduto que mais aumentou seu consumo nos últimos anos.

O iogurte está descrito na literatura como um fluido pseudoplástico, ou seja, a viscosidade diminui com o aumento da taxa de deformação. O iogurte apresenta também, segundo a literatura, um comportamento tixotrópico, onde há uma degradação da sua estrutura, fazendo com que a viscosidade decresça com o tempo. Há poucos estudos publicados a respeito de iogurtes produzidos com leite brasileiro em relação ao comportamento reológico, e seria de grande importância esses estudos, pois dependendo da região, do tipo de alimentação do animal e outros fatores, o leite pode ter uma composição diferente e com isso alterar as características do iogurte.

O objetivo deste trabalho é a determinação do comportamento reológico de iogurtes comerciais disponíveis em rede de supermercados. Procurou-se avaliar o grau de tixotropia dos produtos e foram determinados parâmetros de modelos reológicos simples.

Os dados experimentais foram obtidos no Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da UFSC. O equipamento utilizado foi o Rheotest 2.1, com o dispositivo de cilindros concêntricos.

## **2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Em muitas operações da indústria de alimentos é essencial conhecer o comportamento reológico do fluido, para escolher o equipamento mais adequado no processo. Durante algumas operações, o comportamento reológico pode mudar consideravelmente. Isso ocorre em particular naqueles processos que utilizam calor, resfriamento, homogeneização, concentração, assim como durante muitas fermentações industriais mediante microorganismos. Estas mudanças no comportamento reológico durante o processamento devem ser conhecidas para que sejam projetados os equipamentos mais eficientes utilizados no processo.

A medida da viscosidade é um método muito importante para o controle de qualidade, principalmente para produtos que se supõe ter uma certa consistência em relação a seu aspecto e paladar, como é o caso do iogurte (LEWIS, 1993).

Muitos alimentos exibem comportamento reológico dependente do tempo. O iogurte é derivado do leite e tem uma estrutura de gel de proteína delicada, que se forma durante a fermentação, trabalhos prévios (COULTATE, 1984) tem demonstrado que a viscosidade do iogurte exibe comportamento dependente do tempo e do cisalhamento.

Para caracterizar o cisalhamento e o comportamento dependente do tempo, alguns modelos tem sido utilizados, como exemplo o modelo de Weltmann. Através desses modelos procura-se adequar os resultados experimentais, de modo que se possa descrever o comportamento reológico do iogurte.

### **2.1- Estudos Reológicos**

A reologia é a ciência que estuda as deformações dos materiais quando submetidas a forças externas. O campo da reologia estende-se desde a mecânica de fluidos newtonianos até à elasticidade de Hooke (BIRD et al., 1960).

O conhecimento do comportamento reológico de produtos alimentícios é essencial para várias aplicações, entre as quais projetos e avaliação de processos, controle de qualidade, correlação com a avaliação sensorial e compreensão da estrutura (RAO, 1986).

Os fluidos ideais e os viscoelásticos deformam-se irreversivelmente, ou seja, quando tensões são aplicadas sobre esses materiais, eles escoam. A energia de deformação é dissipada dentro dos fluidos em forma de calor e não pode ser recuperada se a tensão aplicada for cessada. Aqui é importante ressaltar que devido ao escoamento, esses materiais são estudados na reologia, pela relação entre sua taxa de deformação e tensão de cisalhamento.

Para diferenciar a composição do iogurte, melhorar a consistência e o aspecto, poderão ser agregados ingredientes tais como ágar-ágar, gelatina, açúcar, glicose, leite em pó, sabores, etc. O comportamento reológico é influenciado pela composição do iogurte, que apresenta geralmente comportamento não-newtoniano.

Segundo AFONSO et al., (1999), a importância do conhecimento do comportamento reológico do iogurte está na sua utilização como medida de qualidade, além de ser indispensável em projetos, avaliação e operação de equipamentos processadores e de fundamental importância na economia de energia, o que, atualmente, se tornou extremamente importante, a ponto de cada vez mais as operações de troca de calor e massa serem feitas de forma precisa (BEZERRA, 2000).

### **2.1.1- Lei da Viscosidade de Newton**

Isaac Newton introduziu o conceito de viscosidade em 1687; considerou um fluido localizado entre duas placas paralelas separadas entre si por uma distância  $dy$  e quando uma força é aplicada sobre a placa superior, o fluido se movimenta. A lei de Newton afirma que a força por unidade de área necessária para manter o movimento do fluido (mais conhecida por tensão de cisalhamento) é proporcional ao gradiente de velocidade na direção perpendicular ao fluxo. A viscosidade é sinônimo de atrito interno e é a medida da resistência ao escoamento (BIRD et al., 1960).

A equação matemática que descreve o comportamento desses fluidos é dada por

$$\tau = \mu \gamma \quad (2.1)$$

Sendo a representação esquemática representada a seguir

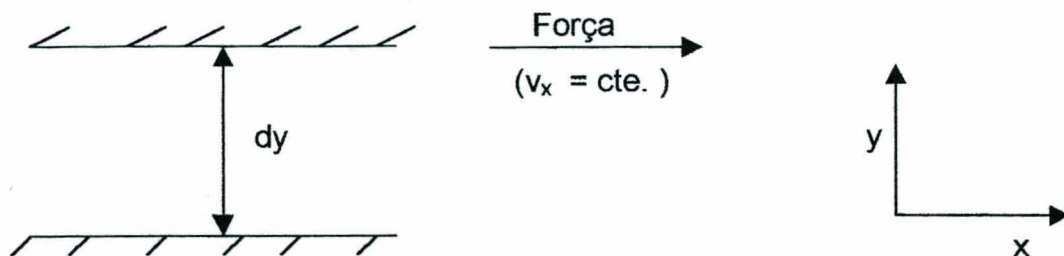


Figura 2.1 – Escoamento de um fluido entre duas placas paralelas.

Onde

$$\tau = \text{tensão de cisalhamento} = \frac{\text{Força}}{\text{Área}} \quad (\text{N/m}^2 = \text{Pa})$$

$$\gamma = \text{taxa de deformação} = \frac{dv_x}{dy} \quad \left( \frac{\text{m/s}}{\text{m}} = \text{s}^{-1} \right)$$

$\mu$  = viscosidade absoluta (Pa.s)

$v_x$  = velocidade na direção x ( m/s )

A dimensão física da viscosidade é dada por  $[ML^{-1}T^{-1}]$  e a unidade no SI (Sistema Internacional) é o Pascal segundo, abreviado como Pa.s. Outra unidade tradicionalmente usada é o Poise (P) do sistema cgs. Como exemplo a viscosidade da água a  $20,2^\circ\text{C}$  é 1 mPa.s ou 1 cP. Portanto 1 cP corresponde a  $1 \times 10^{-3}$  Pa.s.

### 2.1.2- Fluidos Newtonianos

Os fluidos que obedecem ao postulado de Newton descrito pela equação (2.1) são chamados de fluidos newtonianos. Para estes fluidos, o escoamento acontece logo que a tensão é aplicada e a viscosidade é independente da taxa de deformação e da tensão de cisalhamento, dependente somente da composição e da temperatura. Portanto esses fluidos não resistem sequer à uma força infinitesimal, por isso escoam e se moldam ao recipiente que os contém.

A viscosidade, para fluidos que apresentam esse tipo de comportamento, é obtida da relação linear entre a tensão de cisalhamento aplicada (no eixo das ordenadas) e a taxa de deformação resultante (no eixo das abcissas).

Exemplos de alimentos que apresentam comportamento newtoniano são sucos clarificados de maçã e uva, leite natural, óleos refinados, refrigerantes, cervejas e vinhos, e mesmo materiais muito viscosos como o mel e a glicose de milho, também são newtonianos ( BEZERRA, 2000 ).

É importante salientar que esse comportamento pode mudar para taxas de deformação muito altas, maiores que  $10^6 \text{ s}^{-1}$ , quando então outras forças se tornam importantes.

### 2.1.3- Fluidos Não-Newtonianos

Soluções de macromoléculas e suspensões geralmente não obedecem à lei de Newton descrita anteriormente (HARPER, 1960).

Todos os fluidos que não apresentam comportamento newtoniano são designados genericamente de não-newtonianos. Para caracterizar os fluidos não-newtonianos pode ser usada a viscosidade aparente ( $\eta$ ) a uma taxa de deformação específica

$$\eta = \tau / \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

A uma temperatura constante, a viscosidade aparente para fluidos independentes do tempo depende somente da taxa de deformação ou da tensão de

cisalhamento. O comportamento desses tipos de fluidos pode ser dividido nas categorias: pseudoplásticos e dilatantes, dependendo se a viscosidade aparente decresce ou aumenta com a taxa de deformação (BARNES et al., 1989).

Os reogramas relacionados aos fluidos independentes do tempo podem ser visualizados na Figura 2.2.

Os materiais também podem apresentar ou não uma tensão inicial a ser medida antes deles escoarem como fluidos, são os chamados plásticos de Bingham. O comportamento físico de fluidos com tensão inicial é usualmente explicado em termos da sua estrutura interna, a qual é capaz de impedir o movimento para valores de tensão de cisalhamento menores do que um valor limite  $\tau_0$ . Para  $\tau$  maior que  $\tau_0$  a estrutura interna colapsa, permitindo que haja escoamento. A estrutura interna pode recuperar-se quando  $\tau$  passa a ser menor do que  $\tau_0$  (SKELLAND, 1967).

Para os fluidos dependentes do tempo, a viscosidade aparente depende também da duração da taxa de deformação. Esses fluidos são subdivididos em tixotrópico e reopéticos. No primeiro caso, a uma taxa de deformação fixa, a viscosidade decresce com o tempo, enquanto que para o último a viscosidade aumenta, conforme descrito por SKELLAND (1967). Os reogramas dos fluidos dependentes do tempo podem ser visualizados na Figura 2.3.

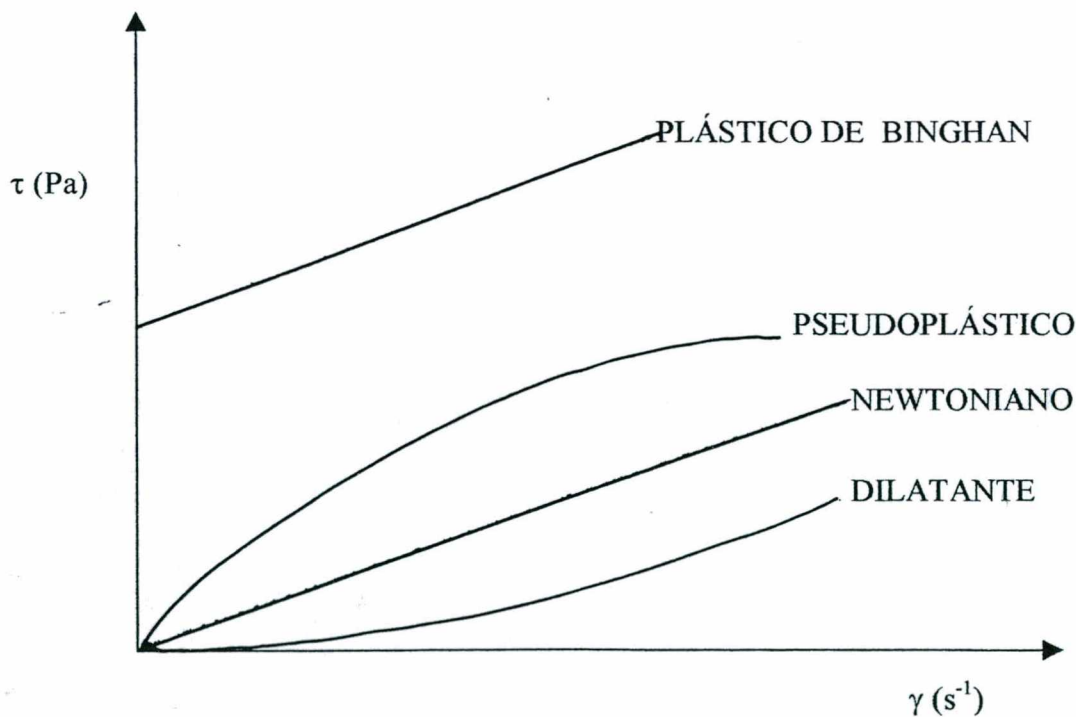


Figura 2.2 – Curvas de escoamento para vários fluidos independentes do tempo.

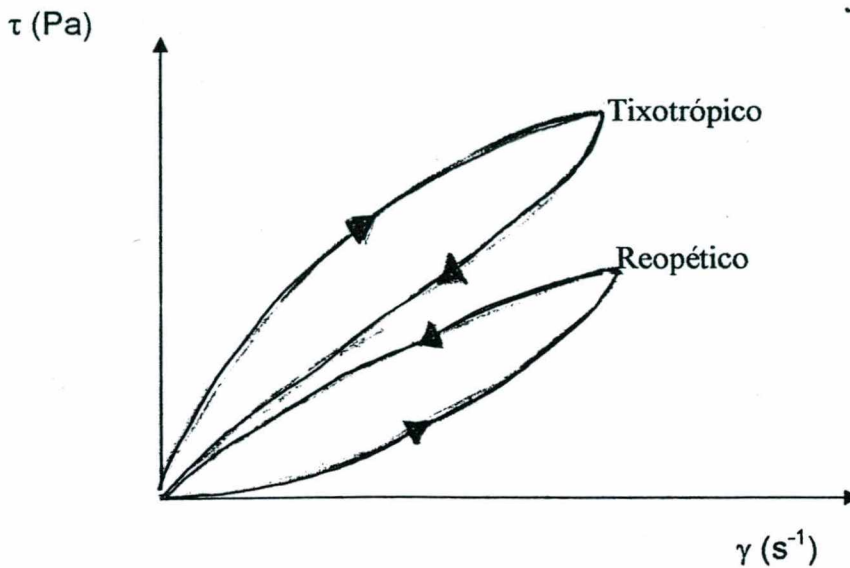


Figura 2.3 – Curvas de escoamento para fluidos dependentes do tempo.

⁴ A deformação de um corpo pode ser dividida em dois tipos gerais:

- (1) deformação reversível após a remoção da tensão de cisalhamento, caracterizando a elasticidade;
- (2) deformação irreversível, caracterizando o escoamento.

O trabalho usado na deformação de um corpo perfeitamente elástico é recuperado quando o corpo retorna para a sua forma original (VAN WAZER et al., 1963). Nos fluidos viscoelásticos tal recuperação é apenas parcial quando o trabalho for removido do material, devido ao fato desses fluidos apresentarem propriedades viscosas, além das elásticas.

\*Um fluido viscoelástico pode ser dependente ou independente do tempo. Se as suas propriedades viscosas sobressaírem perante às elásticas, este será um fluido viscoelástico independente do tempo, como é o caso das soluções poliméricas diluídas, onde a viscoelasticidade induz fatores de atrito menores. Caso contrário, os seus parâmetros reológicos poderão depender da duração do cisalhamento e conseqüentemente apresentar dependência do tempo, como é o caso de sistemas complexos como a clara de ovo natural.

A Figura 2.4 apresenta um esquema simplificado de classificação do comportamento reológico dos fluidos não elásticos

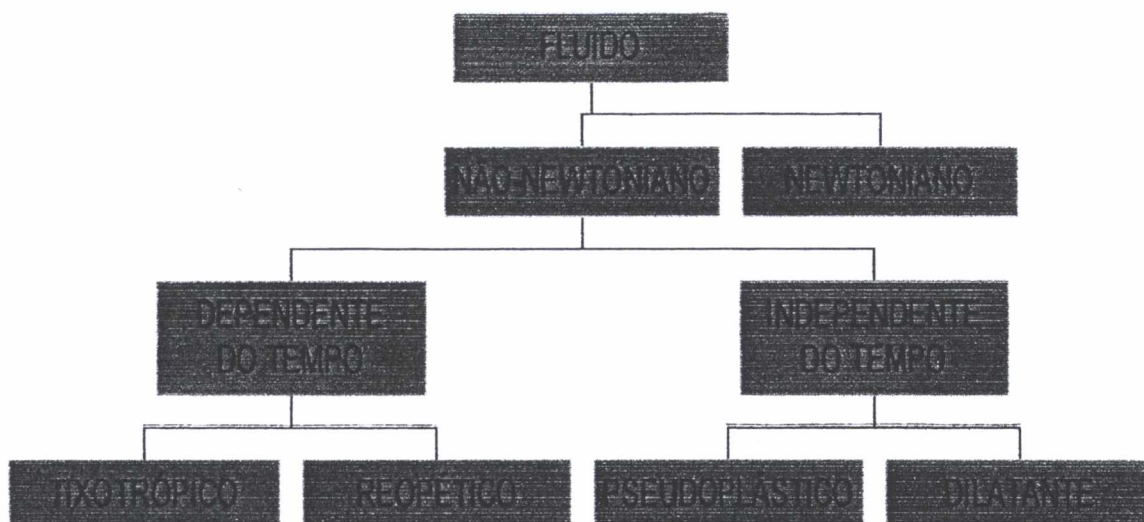


Figura 2.4 – Classificação geral dos fluidos.

## 2.2- Modelos Reológicos

A descrição do comportamento reológico é feita através de modelos empíricos e semi-empíricos, que são usados para relacionar tensão de cisalhamento com taxa de cisalhamento, facilitando os cálculos de engenharia. Deve-se preferir modelos que poderão ser aplicados às faixas de taxa de deformação de acordo com o experimento que gerou o ajuste do modelo.

A maioria dos alimentos fluidos não segue o simples modelo reológico newtoniano no qual uma relação linear entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento é observada. Geralmente tais fluidos apresentam natureza não newtoniana, e as suas propriedades reológicas dependem da tensão aplicada sobre estes, a uma temperatura constante, podendo depender também da duração do cisalhamento (HOLDSWORTH, 1971).

Em outras palavras, a maioria dos fluidos alimentícios não são possíveis de serem caracterizados apenas pela viscosidade, já que esta não é constante, sendo



necessário pelo menos dois parâmetros, portanto modelos mais complexos do que o de Newton.

Os modelos reológicos podem ser isotérmicos ou não isotérmicos. No primeiro caso, descrevem o comportamento do fluido a uma temperatura fixa. No segundo, incluem relações específicas, como funções de temperatura. Dependendo do comportamento, o modelo utilizado possui ou não a tensão inicial.

### 2.2.1- Modelo de Ostwald-de Waele (lei da potência)

Para fluidos não-newtonianos (pseudoplásticos e dilatantes) é bastante usada a equação de Ostwald-de Waele, também conhecida como lei da Potência a 2 parâmetros, pela sua simplicidade e por ser facilmente manuseável na forma logarítmica (linearizada),

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2.3)$$

ou

$$\log_{10} \tau = \log_{10} K + n \log_{10} \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

Onde

$K$  = índice de consistência;

$n$  = índice de comportamento do escoamento.

A viscosidade aparente é expressa como

$$\eta = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.5)$$

A equação que representa o modelo newtoniano pode ser igualada ao caso particular da equação de Ostwald-de Waele, com  $n = 1$  e o valor de  $K$  igual ao valor de  $\eta$  que é igual ao valor de  $\mu$ . Da equação (2.5) observa-se que para valores de  $n < 1$  a viscosidade aparente decresce com o aumento do gradiente de velocidade, caracterizando o fluido como pseudoplástico, enquanto que no caso inverso,  $n > 1$ , é descrito o comportamento dos fluidos dilatantes, nos quais a viscosidade aparente aumenta com o gradiente de velocidade.

### 2.2.2- Modelo de CASSON

Este modelo foi desenvolvido para uma suspensão de partículas interagindo em um meio newtoniano. CASSON (1959), obteve a seguinte expressão matemática

$$\tau^{1/2} = K_{0c} + K_c \dot{\gamma}^{1/2} \quad (2.6)$$

onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento,  $\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação,  $K_c$  é a viscosidade plástica de Casson e o  $K_{0c}$  é a tensão inicial de Casson.

O modelo de Casson foi adotado, como método oficial na determinação da tensão inicial pelo Instituto Internacional do Chocolate. Entretanto, MIZHARI e BERK (1971); RAO et al., (1982), mostraram que este modelo não se adapta a baixos valores de taxa de deformação para o suco de laranja concentrado, o mesmo foi mostrado por RAO e COOLEY (1982) para concentrado de tomate, respectivamente.

### 2.2.3- Modelo de Herschel-Bulkley

Esse modelo é uma modificação do modelo da lei da potência, sendo que a presença da tensão de cisalhamento inicial no modelo de Herschel-Bulkley é o único aspecto que diferencia esses dois modelos reológicos.

O modelo de Herschel-Bulkley pode ser representado pela seguinte equação

$$\tau - \tau_{0H} = K_H \dot{\gamma}^{n_H} \quad (2.7)$$

Onde

$\dot{\gamma}$  = taxa de deformação

$\tau$  = tensão de cisalhamento

$\tau_{0H}$  = tensão de cisalhamento inicial de Herschel-Bulkley

$K_H$  = índice de consistência de Herschel-Bulkley

$n_H$  = índice de comportamento de Herschel-Bulkley

### 2.2.4- Modelo de Weltmann

A dependência do tempo pode ser verificada através do modelo empírico modificado de WELTMANN (1943)

$$\tau = A_1 - B_1 \ln t \quad (2.8)$$

Onde o parâmetro  $A_1$  representa a tensão no início do cisalhamento,  $B_1$  é o coeficiente de ruptura tixotrópica e  $t$  o tempo decorrido.

A dependência do tempo no escoamento é resultado do rearranjo estrutural de sistemas líquidos não-newtonianos.

### 2.2.5- Modelo de Hahn

O modelo de Hahn é uma extensão do modelo de Weltmann, onde as constantes  $A_2$  e  $B_2$  da Equação de Hahn são similares as constantes  $A_1$  e  $B_1$  da Equação de Weltmann.

$$\ln (\tau - \tau_e) = A_2 - B_2 t \quad (2.9)$$

A equação de Hahn necessita do conhecimento da tensão de equilíbrio ( $\tau_e$ ), em um tempo suficientemente longo, quando se atinge uma tensão constante.

### 2.2.6- Modelo de De Kee, Code

O modelo de Herschel–Bulkley foi modificado por De Kee et al., (1983) para incluir um parâmetro estrutural  $\lambda$  que considera os efeitos dependentes do tempo,

$$\tau = \lambda (\tau_0 + K \gamma^n) \quad (2.10)$$

O parâmetro  $\lambda$  varia entre 1 no tempo inicial de cisalhamento ao valor de equilíbrio  $\lambda_e$ , menor que 1. Foi considerada uma equação cinética de ordem  $p$  para o decaimento de  $\lambda$

$$\frac{d\lambda}{dt} = k' (\lambda - \lambda_e)^p \quad (2.11)$$

sendo a constante  $k'$  função da taxa de cisalhamento

$$k' = a \gamma^p \quad (2.12)$$

Para o iogurte testado pelos autores os valores obtidos foram  $9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  para  $k'$  e 1,6 para a ordem da reação.

### 2.2.7- Modelo de Cross

O modelo de Cross abrange uma ampla variação de taxa de deformação quando comparado ao da lei da Potência

$$\frac{\eta_0 - \eta}{\eta - \eta_\infty} = (k_2 \dot{\gamma})^m \quad (2.13)$$

$k_2$  = constante da equação de Cross ( s )

$m$  = constante dimensional da equação de Cross

$\eta_\infty$  = limite de viscosidade aparente para taxa de deformação infinita ( Pa.s )

$\eta_0$  = limite de viscosidade aparente para taxa de deformação zero ( Pa.s )

### 2.3- Medidas Reológicas

Para fluidos newtonianos a viscosidade é obtida através de uma única medida de tensão de cisalhamento e a correspondente taxa de deformação. Porém uma única medida não é suficiente para identificar um fluido como não-newtoniano. São necessários vários dados de tensão de cisalhamento e as correspondentes taxas de deformação, para então se avaliar o comportamento de um fluido e adotar um modelo reológico.

Para isso são utilizados aparelhos conhecidos por reômetros, que podem apresentar diferentes configurações, nas quais as mais comuns são:

- Sistemas Capilares;
- Sistemas Rotacionais.

### 2.3.1- Reômetro Capilar

Neste tipo de reômetro, o fluido escoar no interior de um tubo de seção circular, devido à diferença entre as pressões de entrada e saída do mesmo, que podem ser geradas pela gravidade ou outros meios mecânicos. A partir dos dados geométricos e experimentais, calcula-se a viscosidade do fluido.

Para fluidos newtonianos a viscosidade é dada pela expressão de Hagen-Poiseuille,

$$\mu = \frac{(D\Delta p / 4L)}{(32Q / \pi D^3)} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.14)$$

Onde

D = diâmetro interno do tubo

L = comprimento do tubo

Q = vazão volumétrica

$\Delta p$  = queda de pressão ao longo de L

Um arranjo experimental do tipo capilar que é simples, de fácil operação e de custo bastante reduzido. Neste tipo de montagem, é muito importante certificar-se de que a relação L/D seja tal que os efeitos indesejáveis, principalmente de entrada e de saída, sejam desprezíveis. Na prática esse valor deve ser maior do que 1.000 (GASPARETTO, 1983). Para medidas exclusivamente de viscosidade aparente em materiais não-newtonianos ou de viscosidade no caso dos newtonianos, são muito utilizados os viscosímetros capilares, por exemplo do tipo Cannon-Fenske.

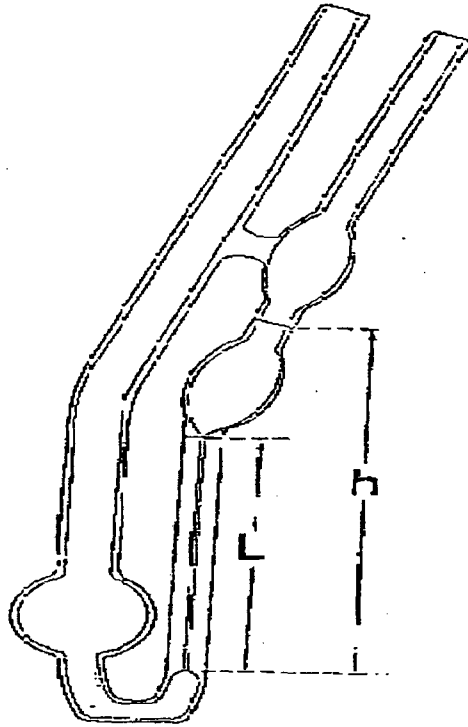


Figura 2.5 – Viscosímetro Cannon-Fenske.

### 2.3.2- Sistemas Rotacionais

A medida de viscosidade de um reômetro rotacional, baseia-se na determinação do torque necessário para manter constante a velocidade de rotação de um corpo que se encontra imerso ou em contato com o fluido (Reômetro Searle). Há também o caso em que se aplica um torque e mede-se a velocidade correspondente (Reômetro Couette). Porém o mais comum é o Reômetro Searle. Esse tipo de reômetro pode apresentar várias configurações, dependendo da geometria dos corpos rotacionais. Dessa forma, os reômetros rotacionais podem ser cilindros concêntricos, cone e placa, placas planas paralelas, etc.

As principais vantagens na utilização dos reômetros rotacionais, quando comparado aos capilares é que esses equipamentos permitem o uso de pequenas amostras de produtos e podem fornecer uma medida contínua da relação taxa de deformação e tensão de cisalhamento, e uma faixa mais ampla da taxa de deformação, permitindo também a análise mais adequada de comportamentos dependentes do tempo.

### **2.3.2.1- Reômetro Rotacional de Cilindros Concêntricos**

Estes reômetro mantêm uma velocidade de rotação constante a certa taxa de deformação e a tensão de cisalhamento é obtida através da medida do torque no cilindro de medida, que pode ser o fixo ou o rotativo. Eles são projetados para causar cisalhamento no fluido localizado entre dois cilindros concêntricos, sendo que um gira e o outro permanece estacionário, permitindo-se obter curvas reológicas, pelo estabelecimento de várias velocidades angulares do cilindro rotativo e do torque correspondente detectado no cilindro de medida.

Na Figura (2.6) o cilindro interno é suspenso por uma haste fixada num suporte, de modo que esse cilindro permaneça fixo enquanto o cilindro externo gira em velocidade angular estabelecida.



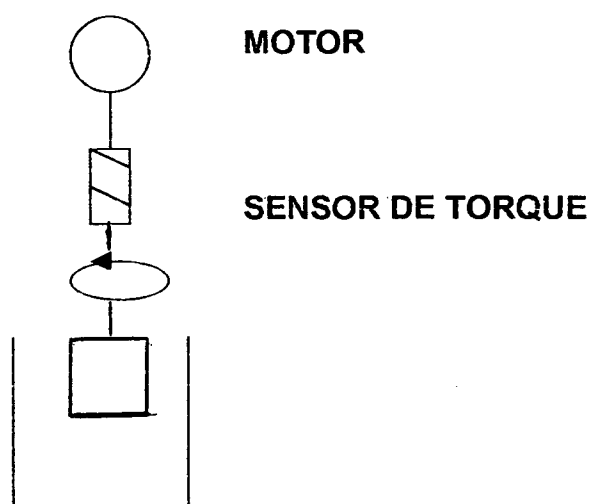


Figura 2.6- Reômetro Rotacional tipo Searle

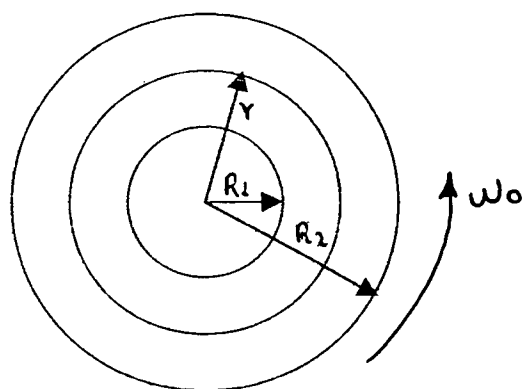


Figura 2.7- Reômetro Rotacional

Abaixo encontram-se as deduções das equações para a medida de viscosidade de líquidos newtoniano em viscosímetros concêntricos.

Pode-se calcular a tensão de cisalhamento na parede do cilindro, desde que se conheça o torque e as dimensões do cilindro

$$\tau(r) = M / 2\pi r^2 h \quad (2.15)$$

A taxa de deformação é dada por

$$\gamma(r) = r \frac{d\omega}{dr} \quad (2.16)$$

Há uma relação funcional, que é expressa através de dados experimentais, entre a tensão de cisalhamento e taxa de deformação que é dada por

$$\tau = f(\gamma) \quad (2.17)$$

$$\frac{r d\omega}{dr} = \frac{1}{\mu} \frac{M}{2\pi r^2 h} \quad (2.18)$$

$$d\omega = \frac{M}{2\pi\mu h} \frac{dr}{r^3} \quad (2.19)$$

Integrando a equação (2.19)

$$\int_0^{\omega_0} d\omega = M / 2\pi\mu h \int_{R_1}^{R_2} dr / r^3 \quad (2.20)$$

Obtendo-se

$$\omega_0 = \frac{M}{4\pi\mu h} [1/R_1^2 - 1/R_2^2] \quad (2.21)$$

Para verificar o comportamento newtoniano

$$\mu = \frac{M}{4\pi h \omega_0} [1/R_1^2 - 1/R_2^2] \quad (2.22)$$

As deduções das equações para determinar os parâmetros K e n de fluidos que seguem a lei da Potência esta abaixo

$$\gamma = r \frac{d\omega}{dr} \quad (2.23)$$

$$\tau = M / 2\pi r^2 h \quad (2.24)$$

$$r \frac{d\omega}{dr} = [\tau / K]^{1/n} = M / 2\pi K h [1/r^2]^{1/n} \quad (2.25)$$

por consequência

$$d\omega = [M / 2\pi K h]^{1/n} \frac{dr}{2/n + 1} \quad (2.26)$$

integrando

$$\int_0^{\omega_0} d\omega = [M / 2\pi K h]^{1/n} \int_{R_1}^{R_2} dr / 2/n + 1 \quad (2.27)$$

$$\omega_0 = [M / 2\pi K h]^{1/n} \frac{n}{2} [1/R_1^{2/n} - 1/R_2^{2/n}] \quad (2.28)$$

$$\log \omega_0 = 1/n \log M + Y_0 \quad (2.29)$$

$$Y_0 = \log \left\{ \frac{n}{2} [1/R_1^{2/n} - 1/R_2^{2/n}] \right\} - 1/n \log 2\pi K h \quad (2.30)$$

Onde

$\omega$  = velocidade angular do cilindro

$h$  = altura do cilindro

$M$  = torque

$R_1$  e  $R_2$  = raio interno e externo do cilindro

### 2.3.2.2- Reômetro Rotacional de Cone e Placa

O equipamento consiste de uma placa plana horizontal e um cone invertido, cujo vértice situa-se muito próximo à placa. Melhores resultados são obtidos para pequenos ângulos entre a placa e o cone, para que seja válida a suposição  $\tan \alpha \cong \alpha$ . Segundo SCHRAMM (1981), o valor de  $\alpha$  deve ser inferior a 0.0349 rad (ou 2°). A vantagem deste sistema em relação ao de placas paralelas é que a taxa de cisalhamento é constante ao longo da superfície do cone. Portanto cada ponto de medida corresponde a um valor da taxa de deformação, e não a uma média de valores. Bom para ser usado em condições de baixas taxas de cisalhamento.

### 2.3.2.3- Reômetros Rotacionais de Placas Paralelas

Reômetro desse tipo são constituídos de duas placas paralelas em forma de disco, distantes a uma certa altura ('gap') uma da outra.

A distância entre as placas pode ser variada, obtendo-se diferentes faixas de taxa de deformação. Maiores taxas de deformação são alcançadas com placas de maior diâmetro e menor distância entre elas.

Da mesma maneira que os cilindros concêntricos, qualquer uma das duas partes pode girar, para medir o torque necessário (GEHRKE, 1996).

## 2.4- Comportamento Reológico do Iogurte

O iogurte tem uma estrutura de gel de proteína delicada, que se desenvolve durante a fermentação (BENEZECH e MAINGONNAT, 1994). Como resultado dessa estrutura de gel o iogurte exibe um comportamento dependente do cisalhamento e a viscosidade dependente do tempo (DE KEE et al. 1983; STEVENTON et al. 1990; RAMASWAMY e BASAK 1991; BENEZECH e MAINGONNAT 1992; BASAK e RAMASWAMY 1994). Se um líquido com viscosidade dependente do tempo é cisalhado por um determinado período de tempo, atinge uma viscosidade de equilíbrio que depende somente da taxa de deformação (TIU e BOGER 1974; BUTLER e MCNULTY 1995). Para taxa de deformação constante, vários modelos independentes do tempo podem ser usados para relatar a viscosidade por taxa de deformação, como exemplo podemos citar, o modelo de Herschel-Bulkley, modelo de Cross e o modelo da lei da potência.

O modelo da lei da potência tem sido usado extensivamente para descrever o comportamento de viscosidade de vários gêneros alimentícios (MACKKEY et al. 1989; BHATTACHARYA 1994). O modelo de Cross foi utilizado porque abrange uma ampla variação de taxa de deformação quando comparado ao da lei da Potência (BARNES et al. 1989). O modelo de Cross mostra valores assintóticos de viscosidade para taxas de deformação muito altas e muito baixas.

GERAGHTY (1998), caracterizou o comportamento da viscosidade de equilíbrio do iogurte natural disponível comercialmente para uma ampla variação de taxa de deformação ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  a  $10^3 \text{ s}^{-1}$ ) usando os modelos de Cross e da lei da Potência. As medidas de viscosidade foram feitas usando um sistema físico, Rheolab MC 100 Rheometer (Physica MeBtechnik GmbH, Stuttgart, Germany). GERAGHTY comparou os resultados e concluiu que o modelo de Cross mostrou melhor a viscosidade para baixas tensões de cisalhamento.

RAMASWAMY (1992) estudou a influência da adição de concentrações diferentes de soluções de pectina e framboesa no comportamento reológico do iogurte comercial. As características reológicas do iogurte foram avaliadas usando um viscosímetro rotacional controlado por computador (Haake RV20), as curvas de fluxo foram demonstradas através do modelo de Herschel-Bulkley no qual apresenta o valor da tensão inicial. RAMASWAMY concluiu que variações na concentração de

pectina e framboesa adicionada ao iogurte comercial demonstram influência nos parâmetros reológicos, a viscosidade aumenta e o fluido apresenta um comportamento tixotrópico com tensão inicial, as curvas podem ser usadas para estimar a degrabilidade da amostra de iogurte e também o comportamento reológico pode ser controlado pela adição de concentrações de pectina e/ou concentrados de fruta. O modelo de Herschel-Bulkley pode ser descrito adequadamente para todas as amostras avaliadas.

As características reológicas do iogurte podem ser afetadas pela adição de gordura, proteína e hidrocolóides, segundo BENEZECH (1993) o iogurte pode apresentar mudanças na viscosidade e/ou sinerese devido a variações na razão proteínas e gordura, mesmo quando são ajustadas para níveis constantes devido as condições de estocagem e incubação. Alguns ingredientes tem sido adicionados no processamento do iogurte para combater os problemas em relação a viscosidade ( ABRAHAMSEN e HOLMAN, 1980; TAMIME e DEETH, 1980; MODLER et al., 1983; KLUPSCH, 1989; GUINEE e MULLINS, 1993) entre eles está o caseinato de sódio. O caseinato de sódio quando adicionado ao leite do iogurte diminui o índice de consistência (K) e o índice de comportamento (n).

BENEZECH determinou as propriedades reológicas do iogurte utilizando um reômetro (Bohlin VOR), ele adicionou quantidades diferentes de gordura, proteína e gelatina no iogurte e observou as variações de viscosidade. A consistência e a sinerese foram freqüentemente influenciadas pelas variáveis de composição, a adição de proteína mostrou um aumento na consistência e a adição de gordura e gelatina reduziu a sinerese.

SHAKER (1999), estudou o efeito da gordura e pré-aquecimento do leite sobre as propriedades reológicas do iogurte durante o processo de coagulação. Ele adicionou quantidades diferentes de gordura no leite, e mostrou como a viscosidade é dependente do percentual de gordura do leite, quanto maior a quantidade de gordura maior foi a viscosidade, essa dependência deve-se ao fato de que a adição de gordura significa aumento nos sólidos totais, e o aumento dos sólidos confere uma maior consistência para o produto, aumentando a viscosidade. Quanto ao efeito do pré-aquecimento a maior taxa de viscosidade foi obtida no ensaio de maior aquecimento em menor tempo (137<sup>o</sup>C por 2 segundos). O trabalho mostrou que o processo de coagulação do iogurte é fortemente influenciado pelo tratamento térmico. O aumento da viscosidade da coalhada devido ao aquecimento causou um

aumento na desnaturação das proteínas do soro. Nesse trabalho utilizou-se para as medidas experimentais um viscosímetro rotacional convencional digital (Cannon Instrument, LV 2000, State College, PA, USA). O modelo da lei da potência foi utilizado para descrever o comportamento do iogurte durante o processo de coagulação, os valores do índice de comportamento ( $n$ ) em todos os testes foram menores que 1, indicando que o iogurte durante o processo de coagulação se comporta como um fluido pseudoplástico.

As indústrias tem pesquisado várias técnicas diferentes para elevar a quantidade de sólidos totais nas amostras de iogurte com o objetivo de melhorar sua consistência e textura. OZER (1997) trabalhou com quantidades diferentes de leite em pó (integral e desnatado) e caseína em pó com o intuito de aumentar tanto o nível de proteína no produto, quanto sua viscosidade. Para esse trabalho ele utilizou um reômetro dinâmico de tensão controlada com placas paralelas (Rheotech Internacional controlled-stress oscillator). OZER concluiu que todas as amostras exibiram uma frágil estrutura de gel viscoelástico, tanto o leite em pó quanto o caseína aumentam a viscosidade do produto, também demonstrou que o método de manufatura e o tempo de armazenamento influenciaram de maneira significativa nas propriedades reológicas do produto.

SOKÓLOW (1980), trabalhou com a adição de caseinato de sódio em pó; utilizou um viscosímetro Brookfield, e com os resultados obtidos concluiu que a adição do caseinato de sódio em pó não altera a textura e o sabor, diminui a sinerese durante o armazenamento refrigerado, aumenta a concentração protéica e aumenta a viscosidade do produto.

AFONSO (1999), estudou as modificações reológicas do iogurte para diferentes estágios do processo de manufatura, utilizando um reômetro permanente e oscilatório (TA Instruments Weissenberg Rheogoniometer com placas paralelas). As modificações reológicas e estrutural que ocorreram durante o estágio de pós-incubação foram observadas durante análises da amostra do iogurte, confirmando que a degradação estrutural pronunciada ocorre com o aumento das forças de cisalhamento, com a pausa do fluxo existe uma recuperação parcial da estrutura do iogurte. O iogurte coletado no tanque de fermentação anteriormente ao estágio de agitação foi o que apresentou maior degradação estrutural durante o cisalhamento e menor modificação estrutural com o aumento do tempo de estocagem.

BENEZECH e MAINGONNAT (1992) estudaram a influencia das condições de resfriamento nas propriedades de fluxo do iogurte , observaram que sendo baixas as condições de cisalhamento na parede durante o resfriamento, a redução da viscosidade é significativa.

#### **2.4.1- Tixotropia**

Tixotropia é a degradação da estrutura de um fluido, fazendo com que a viscosidade decresça com o tempo. BARNES et al. (1989) definiu um fluido tixotrópico como sendo o material que quando submetido a uma taxa de deformação ou tensão de cisalhamento constante, sofre um decréscimo na viscosidade em relação ao tempo, seguido por uma gradual recuperação quando a tensão ou o cisalhamento são removidos.

MEWIS (1979) e CHENG (1987), definiram tixotropia como uma contínua diminuição da viscosidade aparente com o tempo, sob cisalhamento, com uma subsequente recuperação da viscosidade quando o escoamento é paralisado.

A tixotropia qualifica a propriedade de um corpo de se transformar reversivelmente e gradualmente de um estado de gel a um estado fluido. A tixotropia é a evolução no tempo de mudanças importantes da estrutura microscópica.

Diferentes comportamentos de histerese são obtidos, dependendo da estrutura do corpo e das próprias condições de operação COUARRAZE e GROSSIORD (1991),



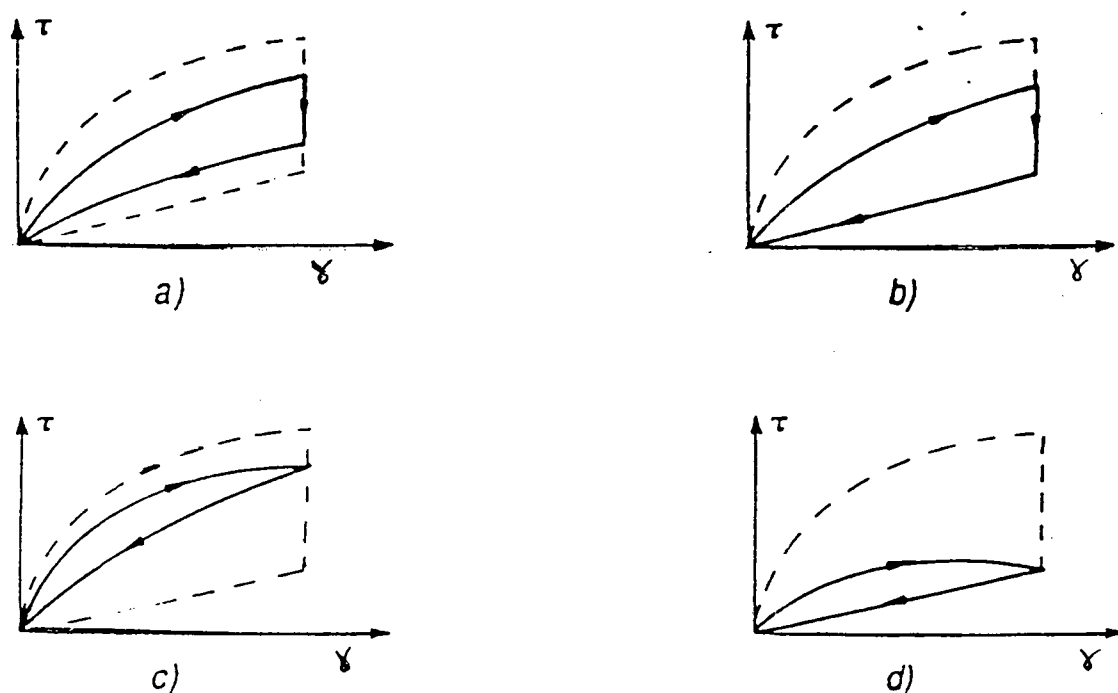


Figura 2.8- Diferentes tipos de histerese

Estudos entre as relações quantitativas da tensão de cisalhamento, taxa de deformação, temperatura e tempo foram desenvolvidos para diferentes gêneros alimentícios. Dados reológicos são apresentados e demonstram que o comportamento tixotrópico (BARNES, 1997) pode ser completamente caracterizado (TUNG et al., 1970; HOLDSWORTH, 1971; TIU & BOGER, 1974; DE KEE et al., 1983).

Vários estudos tem avaliado as propriedades de fluxo do iogurte usando diferentes tipos de medidas reológicas (experimento com taxas de deformação altas e taxas de deformação baixas, tensão de cisalhamento ou taxa de deformação constante), fórmulas empíricas e posteriormente modelos baseado no conceito estrutural mostraram ser validos e amplamente utilizados para quantificar a tixotropia.

No iogurte é de grande interesse tecnológico e comercial realizar o estudo do comportamento reológico em função do tempo, principalmente para estabelecer

condições de processamento , seleção de equipamentos, operações relacionadas com transferência de calor e massa e para o desenvolvimento de novos produtos.

Para quantificar a dependência do tempo de um fluido pode ser utilizado vários modelos distintos, entre eles, o modelo empírico modificado de WELTMANN (1943) (equação 2.8). Este modelo é um dos mais utilizados para a identificação da tixotropia de um material, o qual tem como princípio a regeneração estrutural somente durante o período de repouso. O modelo de Weltmann foi utilizado para investigar as propriedades dependentes do tempo da polpa de manga em trabalho publicado por BHATTACHARYA (1999); demonstrou que quanto mais o fluido for cisalhado haverá uma degradação de sua estrutura e quando esse cisalhamento diminuir a tendência é a estrutura voltar para o estado inicial.

A dependência qualitativa da tixotropia pode ser verificada através da construção de reogramas entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação. O estudo da variação da tensão de cisalhamento com o tempo se obtém cisalhando a amostra a uma taxa de deformação constante.

Trabalhos publicados mostram que com o aumento da taxa de deformação diminui a viscosidade do iogurte, evidenciando que o iogurte é um fluido pseudoplástico (não-newtoniano) altamente tixotrópico com degradação da estrutura, e decréscimo da viscosidade com o tempo (RAMASWAMY e BASAK, 1991).

RAMASWAMY e BASAK (1992) propuseram avaliar a dependência do tempo submetendo-se as amostras à taxa de deformação fixa num período de 60 minutos e seus resultados demonstraram que o decaimento da tensão ainda continua após este tempo.

ABU-JDAYIL e MOHAMEED ( 2002) analisaram o efeito do tempo de estocagem no iogurte concentrado utilizando um viscosímetro de cilindros concêntricos. Os experimentos foram realizados a 25° C após 0, 1, 2, 5, 8, 10 e 14 dias do produto ser embalado. Foi estudado o comportamento tixotrópico com um modelo cinético estrutural, e após a ruptura estrutural foi utilizado o modelo da lei da potência , sendo que neste caso não ocorria mais o efeito do tempo de estocagem. Observou-se que o decaimento da tensão de cisalhamento com o tempo é mais acentuado nos primeiros 10 min, atingindo-se uma tensão constante ( tensão de equilíbrio ) após um tempo aproximado de 40 min.

### **3- MATERIAIS E MÉTODOS**

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos ( PROFI ) do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da UFSC.

Os iogurtes utilizados foram adquiridos em supermercados da região de Florianópolis - SC. Foram escolhidas seis amostras de iogurtes naturais, sendo três integrais e três desnatados, com diferentes consistências. Analisou-se o comportamento reológico do produto de prateleira, usando-se um equipamento de cilindros concêntricos.

#### **3.1- Amostras utilizadas**

Os produtos adquiridos no supermercado foram denominados da forma listada a seguir, sendo que o nome comercial não é apresentado.

- Amostra A : iogurte natural integral, consistência firme;
- Amostra B : iogurte natural desnatado, consistência firme;
- Amostra C : iogurte natural integral, consistência firme;
- Amostra D : iogurte natural desnatado, consistência firme;
- Amostra E : iogurte natural integral, consistência suave;
- Amostra F : iogurte natural desnatado, consistência firme.

No iogurte com consistência firme a fermentação acontece na própria embalagem e no de consistência suave a fermentação ocorre em tanques.

A composição das amostras é apresentada na Tabela 3.1, de acordo com o rótulo de cada produto,

Tabela 3.1- Descrição da composição das amostras de iogurte. Valor nutritivo aproximado para 100g de produto.

	Amostra A	Amostra B	Amostra C	Amostra D	Amostra E	Amostra F
Valor energético	76,67 kcal	40,65 kcal	55,00 kcal	42,00 kcal	68,00	43,00
Proteínas	3,78 g	4,32 g	4,00 g	3,80 g	3,80 g	4,10 g
Carboidrato	6,48 g	7,03 g	5,00 g	5,20 g	5,65 g	6,00 g
Gordura	3,78 g	0,00 g	2,80 g	0,40 g	3,40 g	0,30 g
Cálcio	151,00 mg	151,35 mg	130,00 mg	152,00 mg		
Fósforo			108,00 mg	113,00 mg		
Sódio	64,86 mg	72,97 mg				
Ferro	0,00 mg	0,00 mg		0,62 mg		

### 3.2- REÔMETRO

Para determinação dos dados reológicos, foi utilizado um reômetro de cilindros concêntricos, marca Rheotest 2.1. Esse equipamento serve para medir a viscosidade dinâmica de líquidos newtonianos e para uma investigação do comportamento de líquidos não-newtonianos.

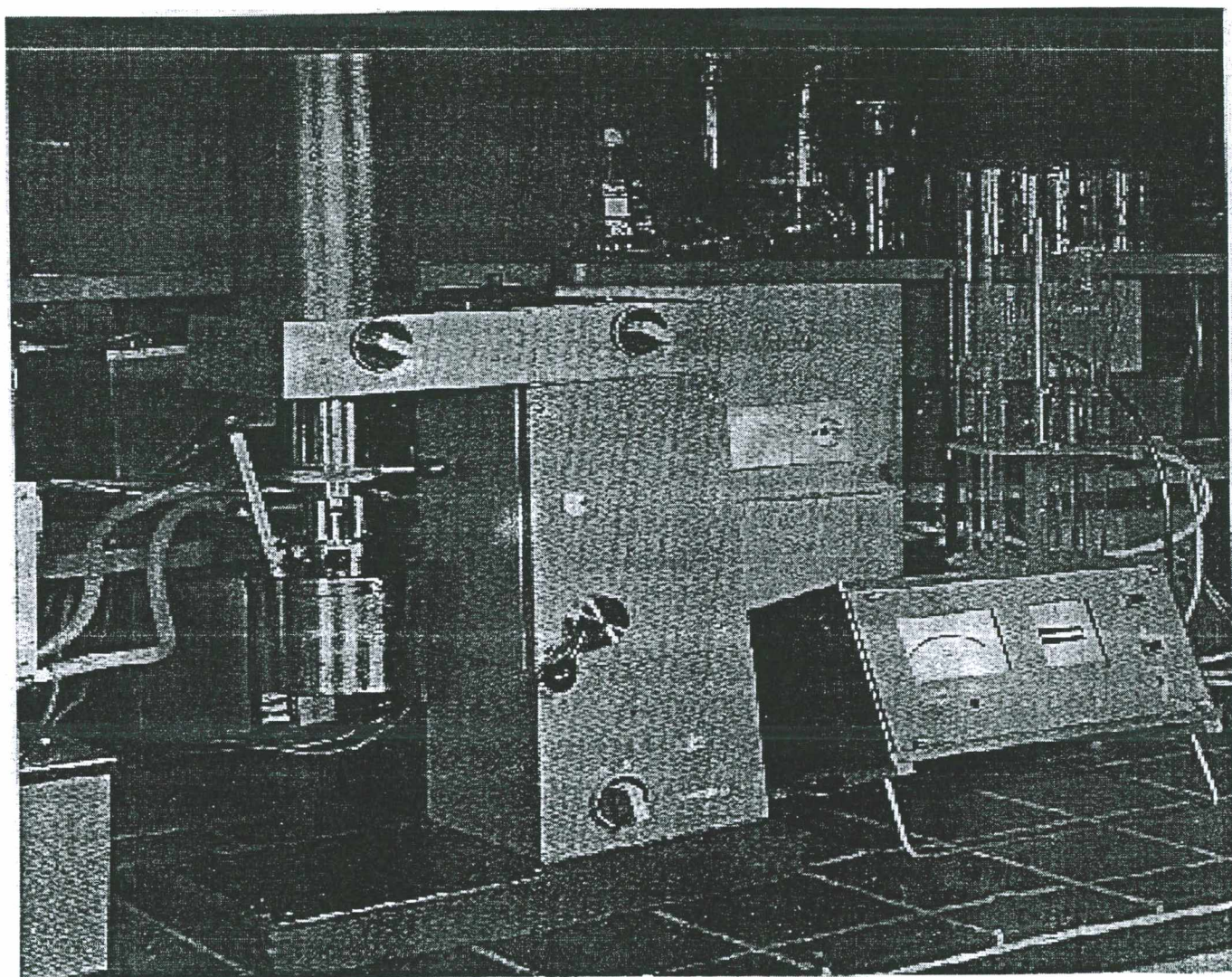


Figura 3.1 - Viscosímetro de Cilindros Concêntricos – RHEOTEST 2.1.

O Rheotest 2.1 possui um dispositivo que permite as seguintes variações:

- velocidade de rotação do cilindro interno de 0,028 a 243 rpm;
- viscosidade entre 1 e  $1,8 \times 10^8$  mPa.s;
- tensão de cisalhamento entre 1,6 e  $3 \times 10^3$  Pa;
- taxa de deformação entre 0,02 e  $1,3 \times 10^3$  s<sup>-1</sup>.

O equipamento possui vários sistemas de medidas que diferem entre si no raio do cilindro interno. O Rheotest admite seis combinações de cilindros projetados com dimensões geométricas diferentes, são eles N, S1, S2, S3, H e Z. Para o copo S foram projetado os cilindros internos N para baixas viscosidades e os cilindros S1, S2 e S3 para viscosidades médias. O copos H e o Z possuem cilindros internos específicos, o primeiro mede viscosidades altas e o segundo é especialmente utilizado para medir a viscosidade de lubrificantes e pastas.

O reômetro é equipado com uma camisa termostática situada ao redor do cilindro externo e em cujo, no interior circula água para aquecimento ou resfriamento da amostra, todo o sistema é de aço inoxidável.

Para os experimentos foram utilizados os cilindros internos S2 ou H, pois servem para medir viscosidades que variam de 7 a  $1,8 \times 10^7$  mPa.s e a relação entre o raio do copo e o raio do cilindro interno é 1,06 e 1,24 para os cilindros S2 e H, respectivamente. A quantidade de amostra para o ensaio varia de acordo com o cilindro interno a ser utilizado, no caso de cilindro S2 é utilizado 30 mL de amostra e para o H 17 mL de amostra. A taxa de deformação para o cilindro interno S2 varia de 0,05 a 437 s<sup>-1</sup> e para o H 0,0167 a 145,8 s<sup>-1</sup>, já a tensão de cisalhamento para H varia de 15 a 300 Pa e para o S2 0,05 a 437 Pa.

O reômetro possui um seletor que permite uma variação de alcance da tensão de cisalhamento I e II, cuja relação é de aproximadamente 1:10, ficando garantido que a tensão de cisalhamento pode ser medida em amplos limites no equipamento. A figura 3.2 ilustra o sistema de cilindros concêntricos desse equipamento.

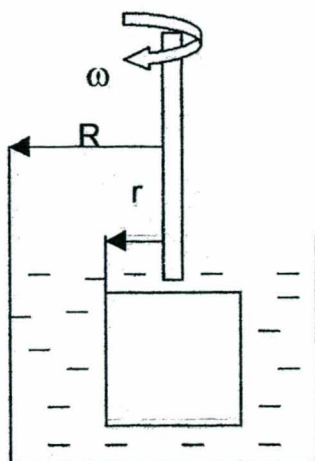


Figura 3.2 - Esquema do sistema de cilindros concêntricos.

### 3.3- Operações com o Reômetro

O cilindro interno foi acoplado ao equipamento e colocou-se a amostra de iogurte no copo do cilindro externo e este foi também conectado ao equipamento que já estava ligado ao banho termostático. O sistema foi deixado em repouso até o equilíbrio da temperatura da amostra com a temperatura de trabalho. Após um determinado período, verificou-se que a temperatura da amostra encontrava-se estabilizada, para isso utilizou-se um termômetro que mede temperaturas entre 0,0 a 100,8 °C.

Após estabilizar a temperatura, iniciaram-se as medidas reológicas. Os experimentos foram feitos em triplicata utilizando-se para cada repetição uma nova amostra igual à anterior, para evitar possíveis erros. A temperatura de trabalho foi de 6 °C.

### 3.4- Medidas

Na determinação da curva reológica de um viscosímetro de cilindros concêntricos, são necessários dados experimentais do torque, da velocidade angular do equipamento, torque e dimensões dos cilindros utilizados.

Com os valores de torque ( $\alpha$ ), obtido através da leitura no equipamento a uma dada faixa de velocidade angular, pode-se convertê-lo em tensão de cisalhamento e obter a viscosidade, através das equações (3.1) e (3.2), as quais foram obtidas no manual do equipamento,

$$\tau = z \times \alpha \quad (3.1)$$

Onde  $z$  é a constante do cilindro ( $10^{-1}$  Pa.1/skt), essa constante depende das dimensões do sistema cilíndrico e da constante elástica do dinamômetro. Para o cilindro S2 e o H,  $z$  tem valor igual respectivamente a 6,19 e 28,1.

A viscosidade é obtida pela relação

$$\eta = \tau / \gamma \quad (3.2)$$

Através dos resultados experimentais obtidos foi possível a determinação de vários parâmetros, tais como o índice de consistência e o índice de comportamento, para o modelo lei da potência

$$\tau = K \gamma^n \quad (3.3)$$

onde a viscosidade aparente é

$$\eta = K\gamma^{n-1} \quad (3.4)$$

Toda parte de cálculo foi feita com o auxílio do software microsoft Excel, o Estatística e o Origen.



#### **4- ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Foram realizadas medidas experimentais tendo como objetivo verificar o grau tixotrópico de cada amostra. Os dados foram obtidos submetendo-se o iogurte à taxas de cisalhamento entre  $0,0200$  e  $175,00 \text{ s}^{-1}$ . O cilindro utilizado para essa parte do experimento foi o H. Foram feitas medidas reológicas com taxas de deformação crescentes e, em seguida, decrescentes para todas as amostras, num intervalo de tempo que não ultrapassou 60 minutos, uma vez que após este intervalo de tempo toda a estrutura do iogurte foi completamente degradada e a tixotropia não mais ocorre.

A presença da tixotropia no iogurte pode ser verificada através das figuras 4.1, 4.2 e 4.3. Esses reogramas relacionam tensão de cisalhamento e taxa de deformação.

Foi verificado que o efeito de histerese é proporcional à taxa de deformação aplicada, porém a resposta do iogurte não muda fundamentalmente. Estes resultados já haviam sido observados por ROHM ( 1992), ou seja, adotando-se diferentes taxas de deformação altera-se a curva da histerese, embora a forma da curva seja conservada.

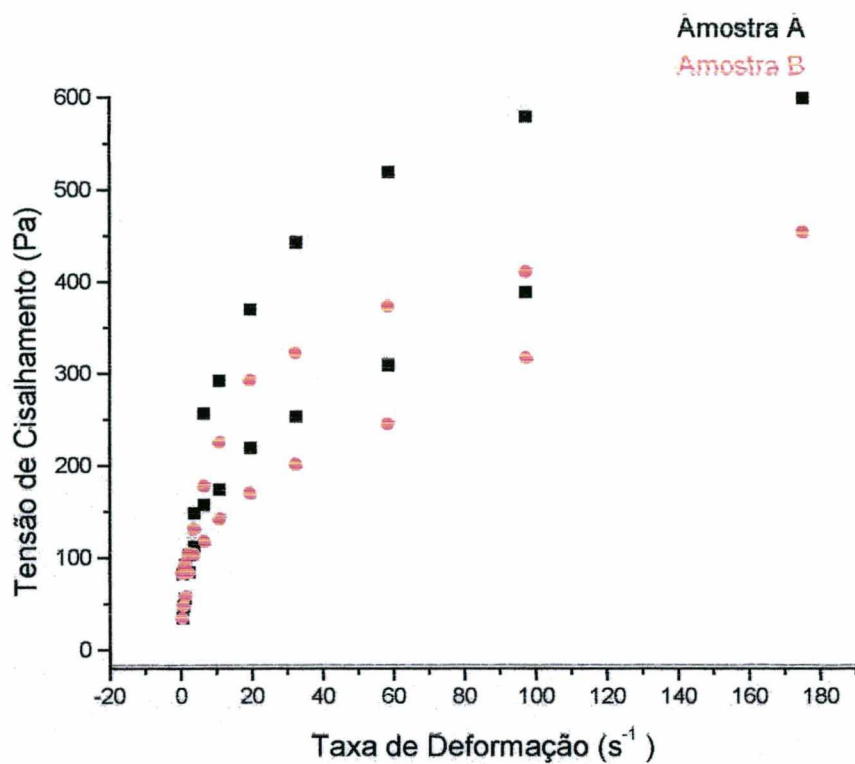


Figura 4.1- Relação entre a taxa de deformação e tensão de cisalhamento para verificação da tixotropia nas amostras A e B.

A amostra A com iogurte integral apresenta maior tensão de cisalhamento em relação à amostra B com iogurte desnatado, e também maior efeito de histerese ( maior área entre as curvas ascendente e descendente), o que pode ser explicado devido a presença da gordura na amostra A ( integral ), com 3,78g ( gordura ) / 100g ( produto).

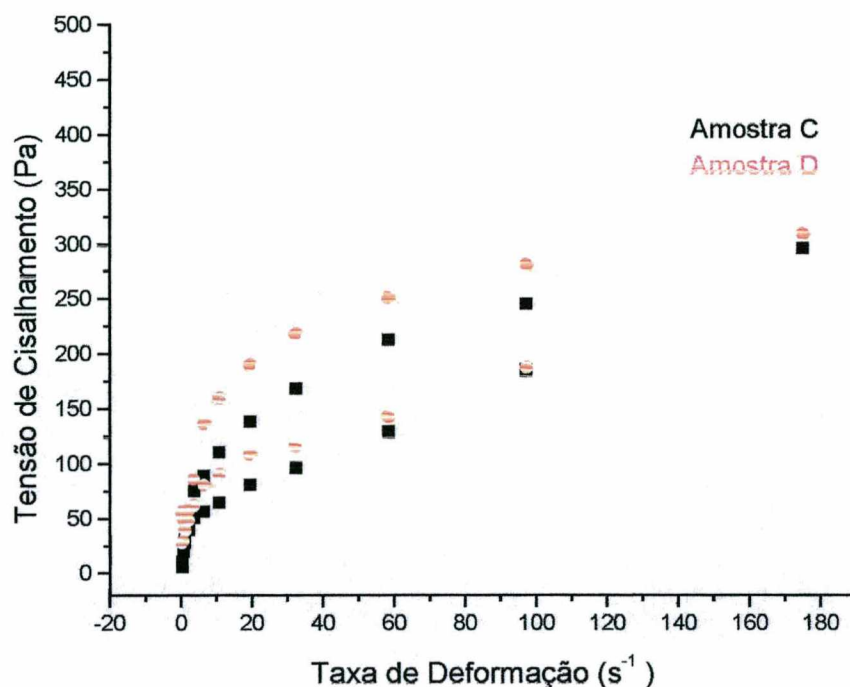


Figura 4.2 - Relação entre a taxa de deformação e tensão de cisalhamento para verificação da tixotropia nas amostras C e D.

As amostras C (integral) e D (desnatado) apresentaram um comportamento bem próximo, com tensões um pouco maiores para o iogurte desnatado. A amostra C apresenta 2,8g (gordura) / 100g (produto) enquanto que a amostra D possui 0,4g (gordura) / 100g (produto). Por outro lado a amostra D apresenta teores de vitamina A, D, E, C, B6, ausente na amostra C.

Deve ser destacado que esta análise pode não justificar totalmente o comportamento apresentado pelos iogurtes C e D. Embora ambos sejam produtos com consistência firme, observou-se que ocorrem variações nas amostras adquiridas, o que evidentemente pode ocasionar alterações nos dados reológicos.

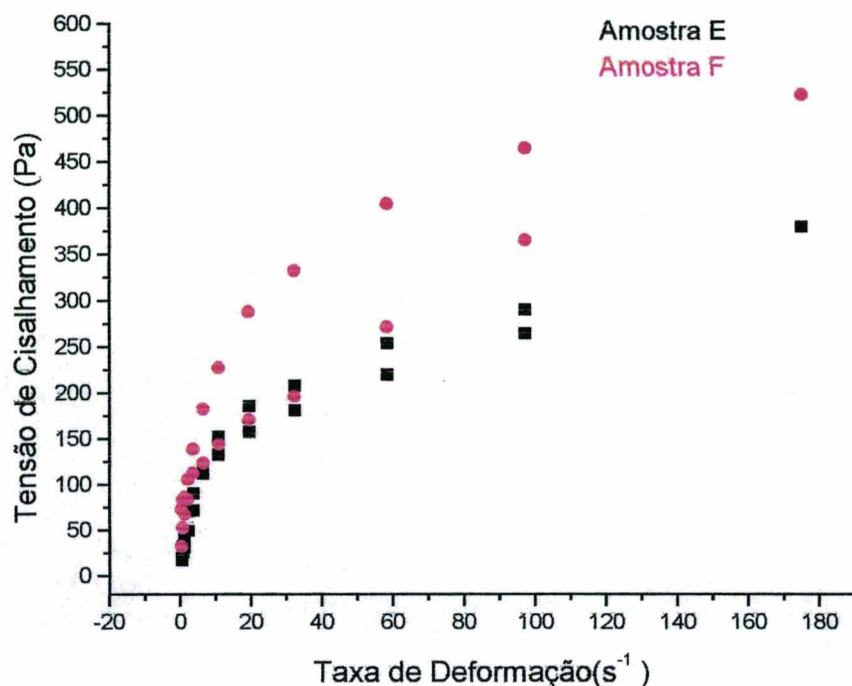


Figura 4.3 - Relação entre a taxa de deformação e tensão de cisalhamento para verificação da tixotropia nas amostras E e F.

Sendo o grau de tixotropia medido pela área entre as curvas ascendente e descendente, observa-se que a amostra E apresenta um menor grau tixotrópico, e sendo a única entre as seis amostras estudadas a apresentar " consistência suave " (cremoso). O seu comportamento reológico é realmente bem distinto dos demais iogurtes analisados.

As maiores tensões apresentadas pela amostra F (desnatado) podem ser explicadas pela sua consistência firme.

As medidas foram realizadas a intervalos de 5 minutos, totalizando 60 minutos ( 12 taxas de deformação). O período de 5 minutos foi arbitrariamente escolhido, pois não foi encontrado nenhuma sugestão de padronização deste tipo de teste reológico na literatura.

Anteriormente a estes experimentos as amostras foram submetidas a uma taxa de deformação fixa durante aproximadamente 80 minutos e após este tempo foram impostas taxas de deformação crescentes e, em seguida, taxas decrescentes. Com isto observou-se que a estrutura do iogurte tinha sido completamente rompida nos primeiros 80 minutos de cisalhamento, não ocorrendo a tixotropia quando imposta as demais taxas, a partir dessa informação é que foi determinado o tempo de 60 minutos para os demais experimentos. A Figura 4.4 mostra este comportamento para a amostra F, cujo gráfico é apresentado como exemplo, sendo que foi utilizado o cilindro S2 nesses experimentos.

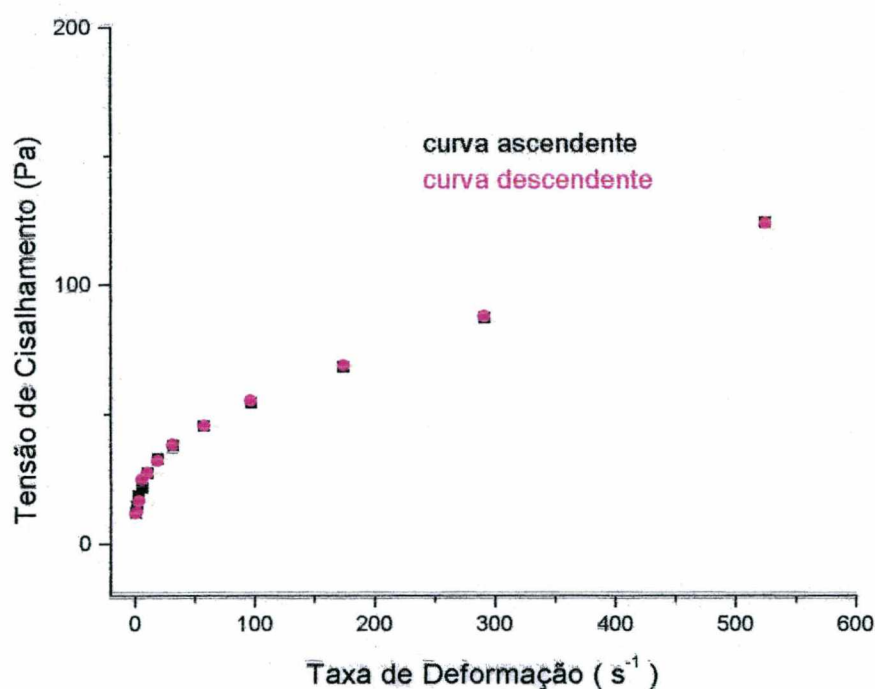


Figura 4.4 - Relação entre a taxa de deformação e tensão de cisalhamento para a amostra F, após 80 minutos de cisalhamento.

Neste trabalho as curvas ascendente e descendente foram aproximadas pelo modelo da lei da potência  $\tau = K \gamma^n$ , onde os parâmetros índice de consistência (K) e o índice de comportamento (n) foram determinados com uma regressão linear; a tabela 4.1 mostra os resultados obtidos.

RAMASWAMY e BASAK (1992) modelaram as curvas ascendente e descendente para iogurtes com concentrados de framboesa, sendo que a curva ascendente seguiu o modelo de Herschel – Bulkley, enquanto que a curva descendente apresentou uma relação linear.

Tabela 4.1- Parâmetros do modelo da lei da potência para todas as amostras analisadas.

<b>Modelo da lei da potência</b>						
	Amostra A	Amostra B	Amostra C	Amostra D	Amostra E	Amostra F
Para as curvas ascendentes						
n	0,51	0,36	0,50	0,33	0,39	0,32
K	33,54	91,28	28,82	59,14	102,00	96,73
r	0,9672	0,9873	0,9523	0,9285	0,9566	0,9746
Para as curvas descendentes						
n	0,43	0,40	0,43	0,37	0,44	0,39
K	41,34	57,09	24,84	32,83	57,05	55,28
r	0,9646	0,9804	0,9751	0,9807	0,98879	0,9865

As figuras 4.5 a 4.10, mostram o confronto dos dados teóricos obtidos através do modelo da Lei da Potência com os dados experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para todas as amostras. As curvas denominadas tcal1 e tcal2 referem-se aos dados teóricos para as curvas ascendentes e descendentes respectivamente, e as curvas denominadas texp1 e texp2 referem-se aos dados experimentais das mesmas curvas anteriores.

Verifica-se que o modelo lei da potência apresenta bons resultados, sendo que a maior diferença foi obtida para a curva ascendente da amostra A. Este modelo foi escolhido por ser o mais largamente utilizado em trabalhos de engenharia e apresentar soluções analíticas em grande variedade de escoamento.

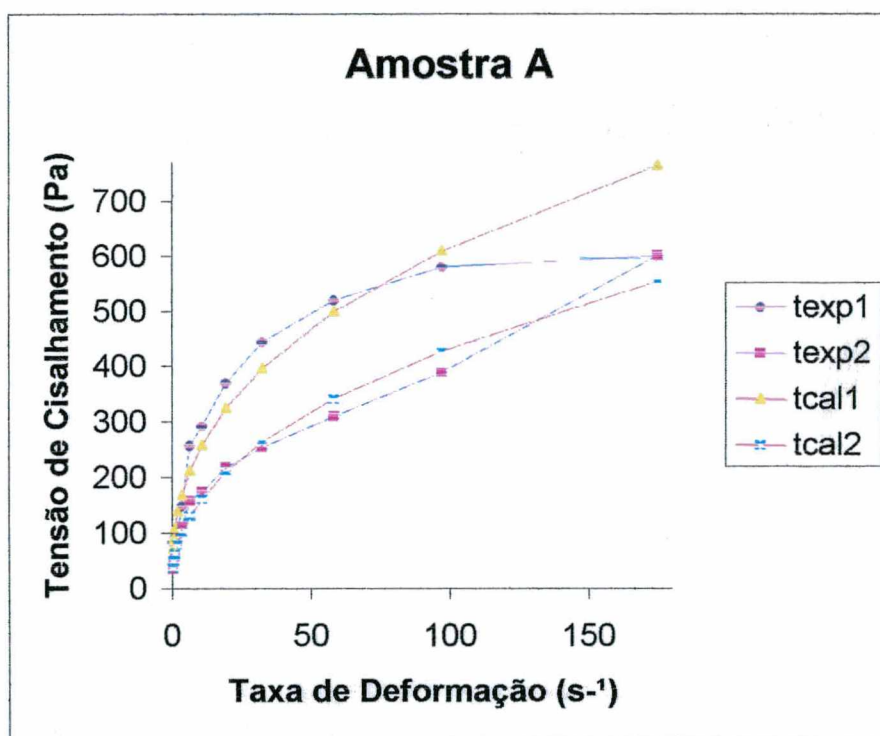


Figura 4.5 – Confronto dos dados teóricos obtidos através do modelo lei da potência com os dados experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para a amostra A.

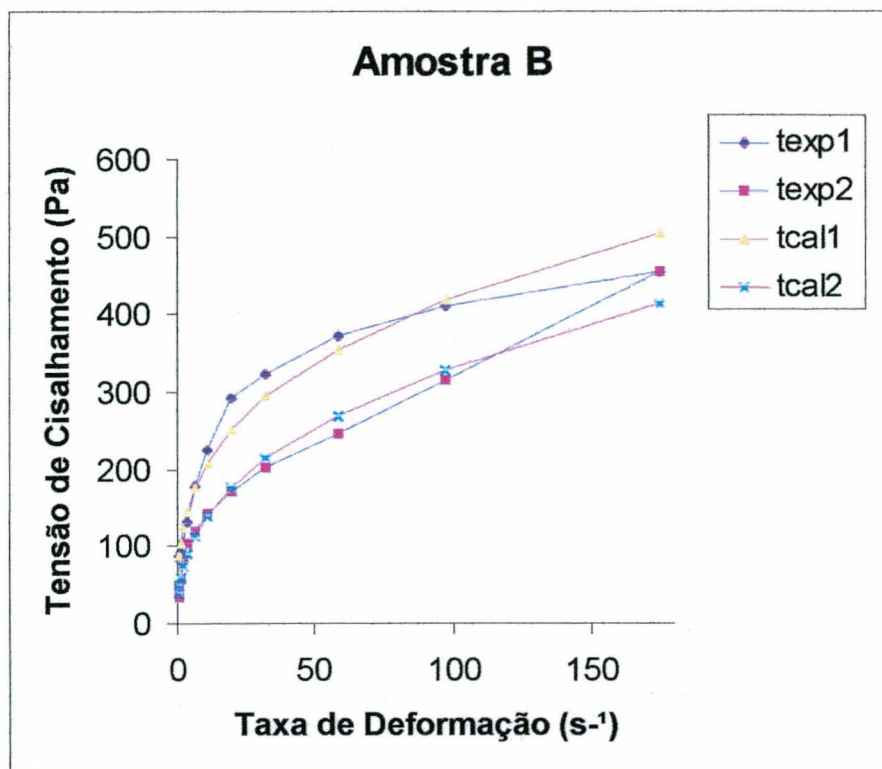


Figura 4.6 – Confronto dos dados teóricos obtidos através do modelo lei da potência com os dados experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para a amostra B.

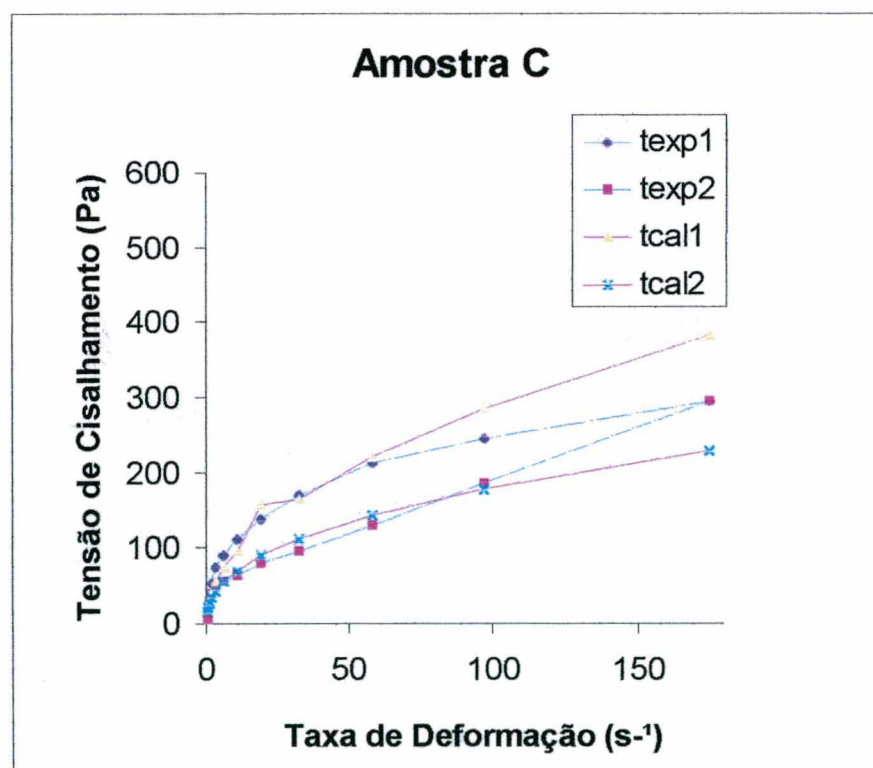


Figura 4.7 – Confronto dos dados teóricos obtidos através do modelo lei da potência com os dados experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para a amostra C.



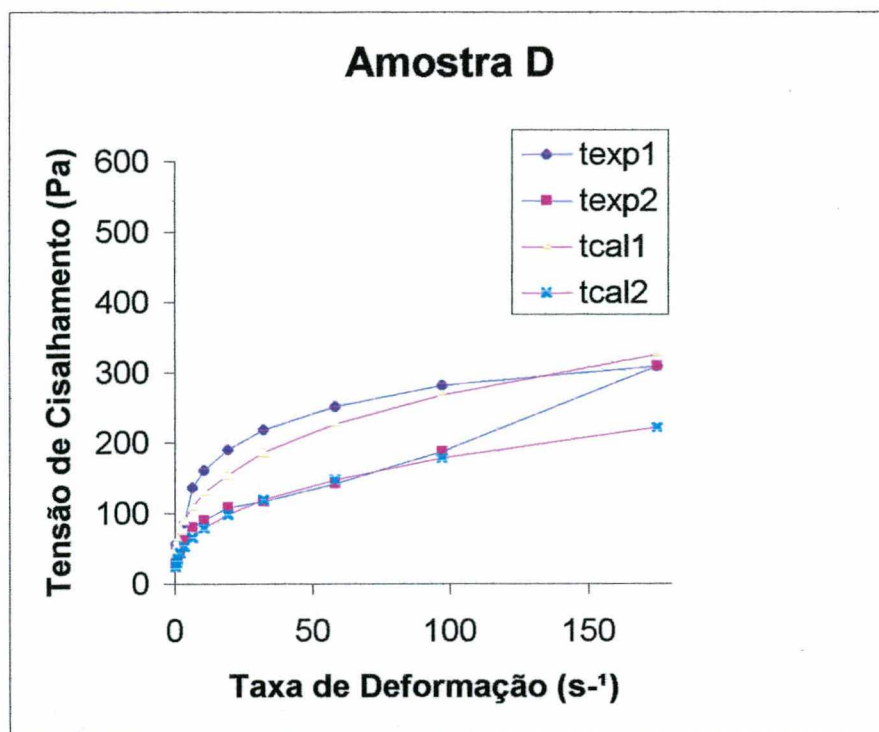


Figura 4.8 – Confronto dos dados teóricos obtidos através do modelo lei da potência com os dados experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para a amostra D.

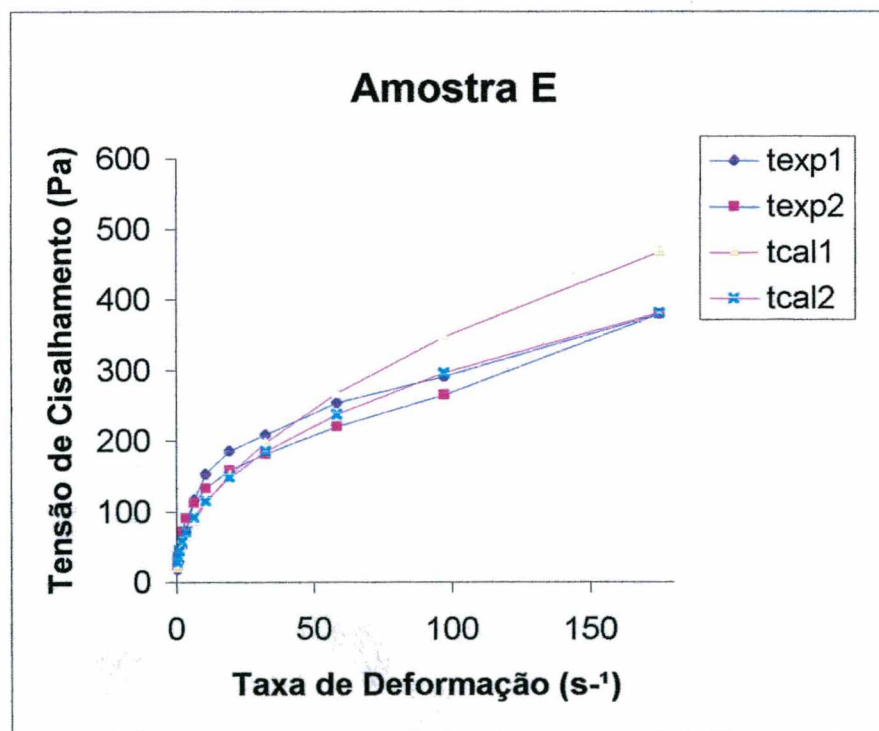


Figura 4.9 – Confronto dos dados teóricos obtidos através do modelo lei da potência com os dados experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para a amostra E.

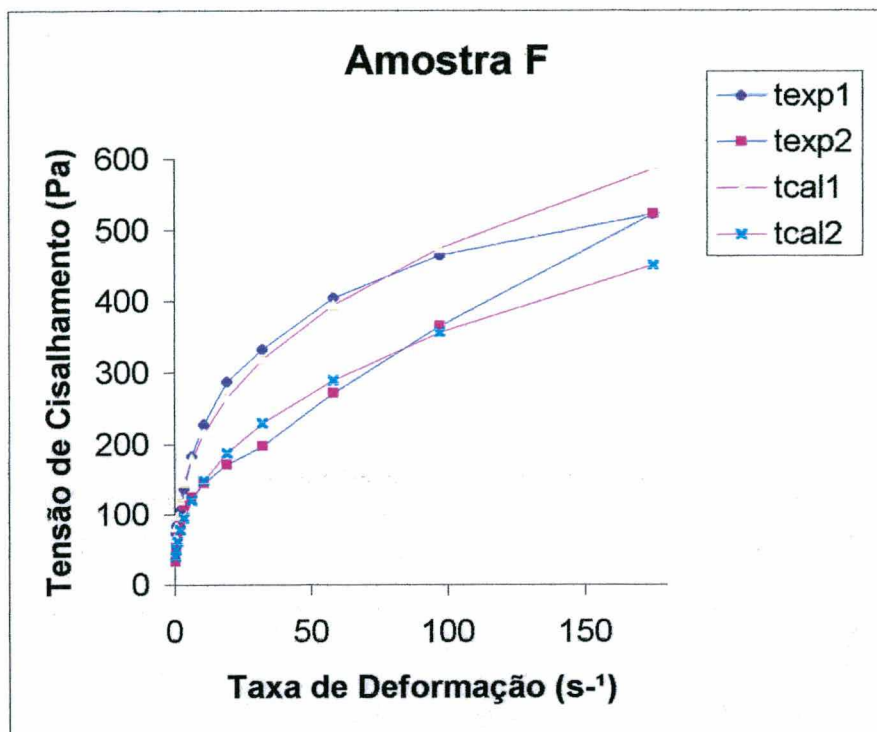


Figura 4.10 – Confronto dos dados teóricos obtidos através do modelo lei da potência com os dados experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para a amostra F.

Com os mesmos dados obtidos anteriormente para as curvas experimentais foi possível relacionar a taxa de deformação com a viscosidade aparente, para as curvas crescente e decrescente. As figuras 4.11 a 4.16 apresentam os resultados da viscosidade aparente; essas indicam uma diminuição da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação.

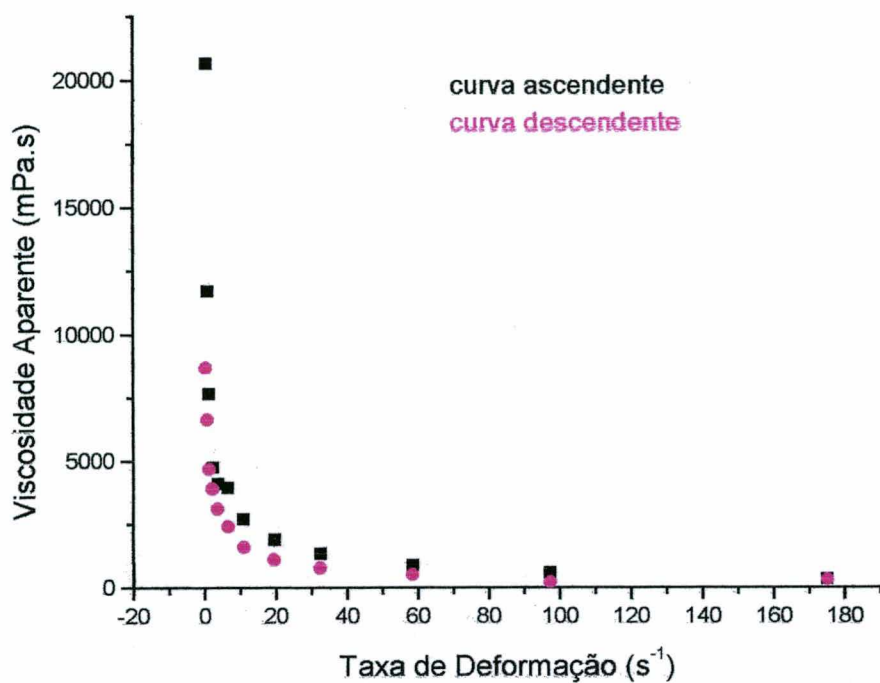


Figura 4.11 - Viscosidade aparente da amostra A, para diferentes taxas de deformação.

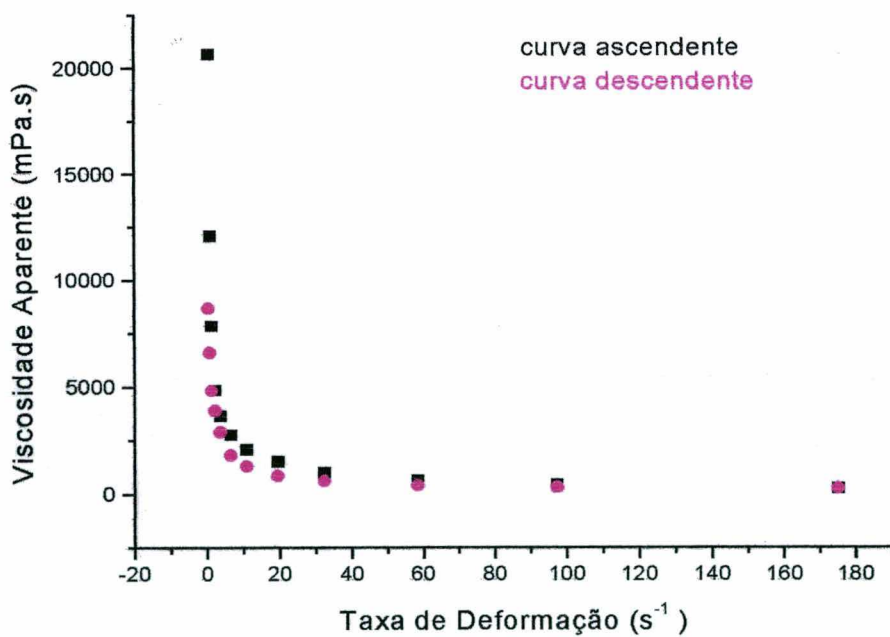


Figura 4.12 - Viscosidade aparente da amostra B, para diferentes taxas de deformação.

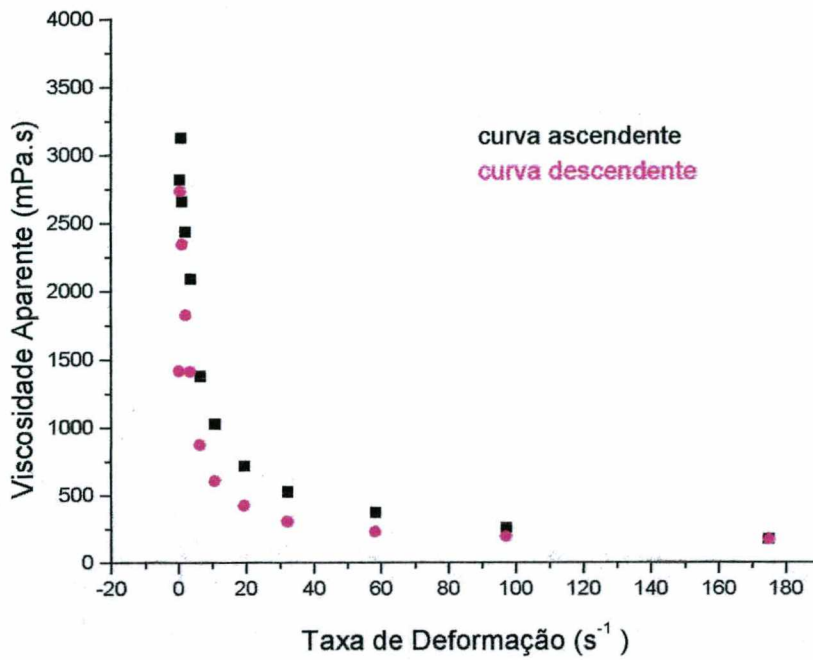


Figura 4.13 - Viscosidade aparente da amostra C, para diferentes taxas de deformação.

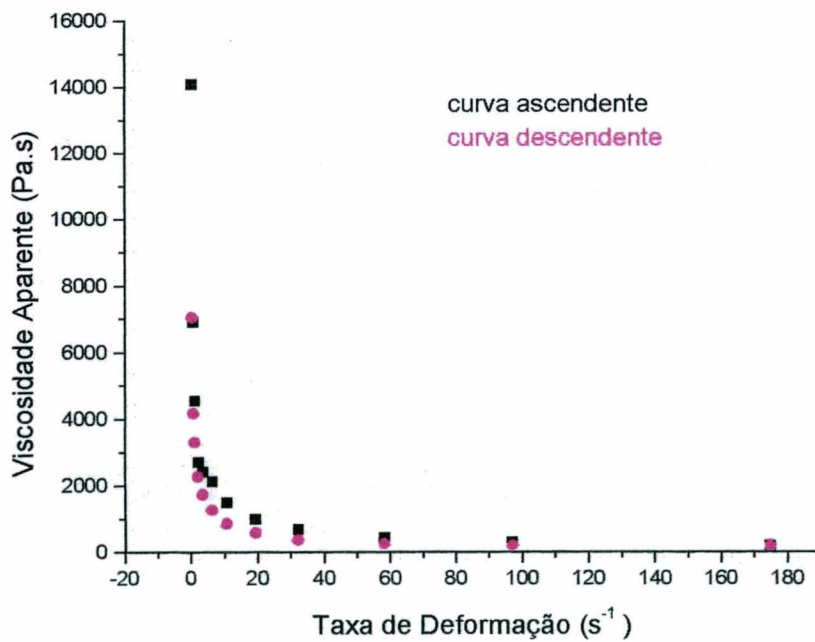


Figura 4.14 - Viscosidade aparente da amostra D, para diferentes taxas de deformação.

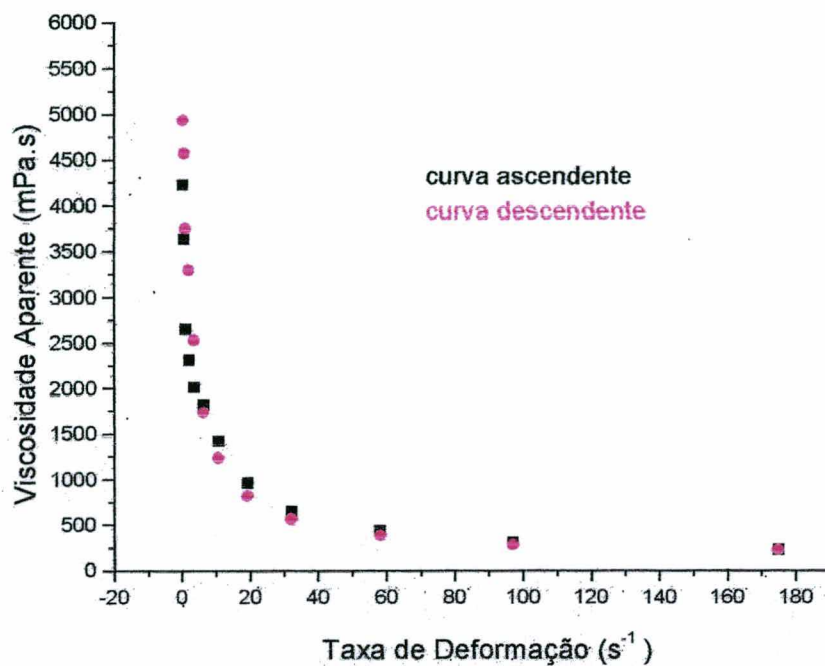


Figura 4.15 - Viscosidade aparente da amostra E, para diferentes taxas de deformação.

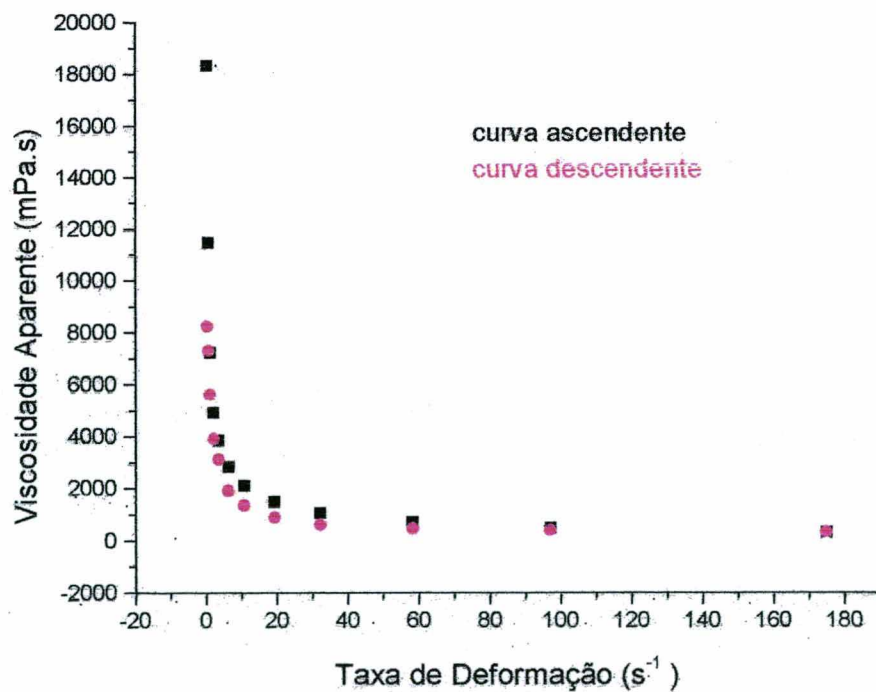


Figura 4.16 - Viscosidade aparente da amostra F, para diferentes taxas de deformação.

O decaimento da tensão de cisalhamento com o tempo foi obtido fazendo-se experimentos a três distintas taxas de deformação (  $58,33 \text{ s}^{-1}$ ,  $174,96 \text{ s}^{-1}$  e  $524,88 \text{ s}^{-1}$  ).

Obteve-se a cada 5 minutos o valor das leituras para as amostras C, D, E e F em um período de tempo indeterminado, para essa parte do experimento foi utilizado o cilindro interno S2. Observou-se que até aproximadamente 80 minutos a tensão de cisalhamento diminui com o tempo, após este período ela permanece constante, ou seja, independente do tempo a tensão é sempre a mesma, como pode ser observado nas figuras 4.17 – 4.20.

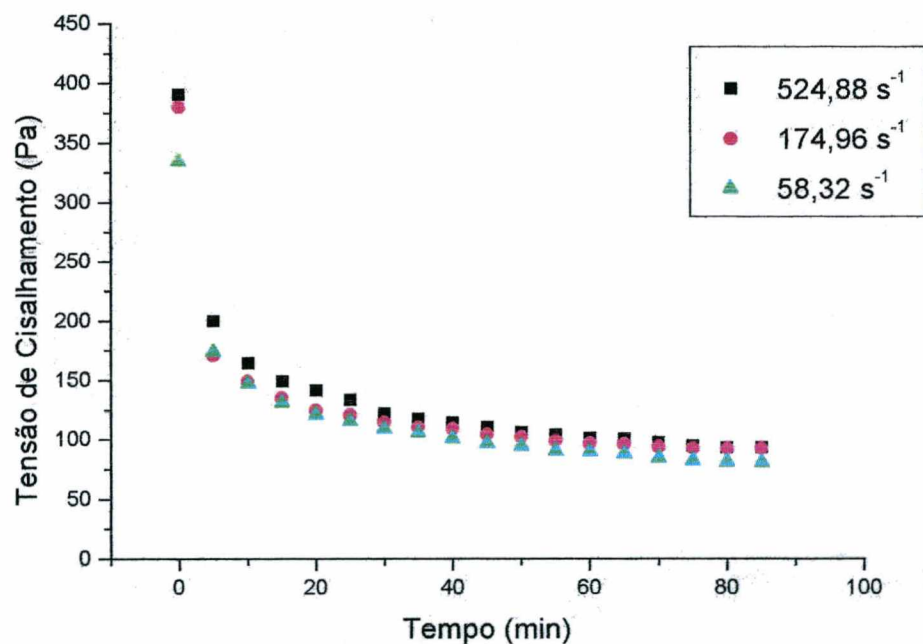


Figura 4.17 – Determinação da tensão de cisalhamento em diferentes taxas de deformação para a amostra C.

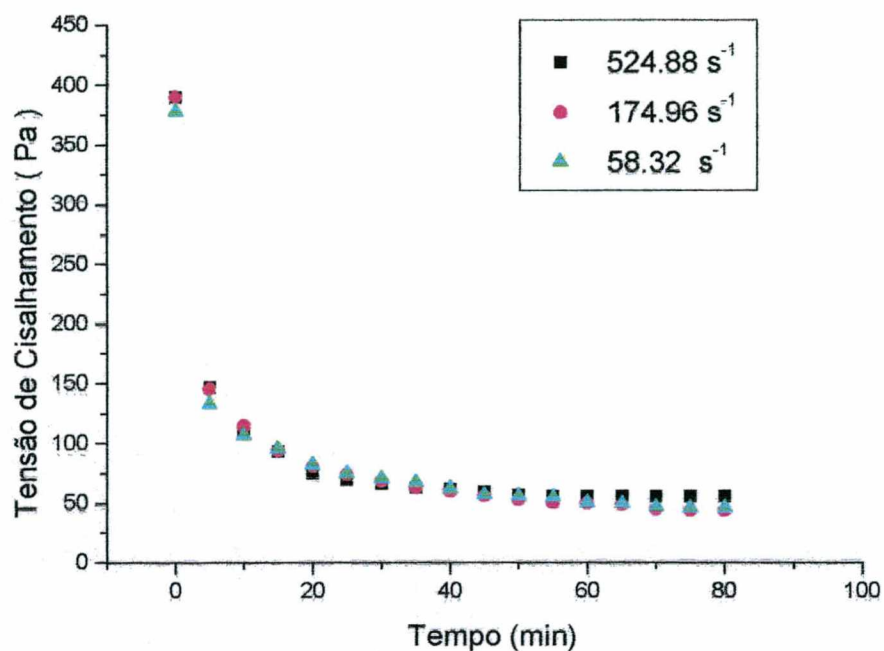


Figura 4.18 – Determinação da tensão de cisalhamento em diferentes taxas de deformação para a amostra D.

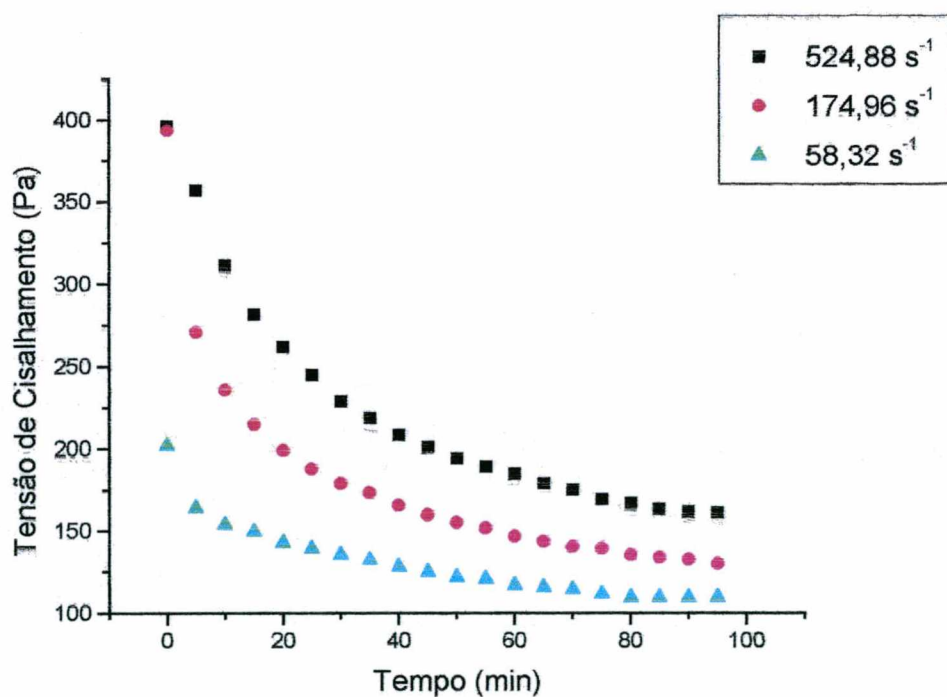


Figura 4.19 – Determinação da tensão de cisalhamento em diferentes taxas de deformação para a amostra E.

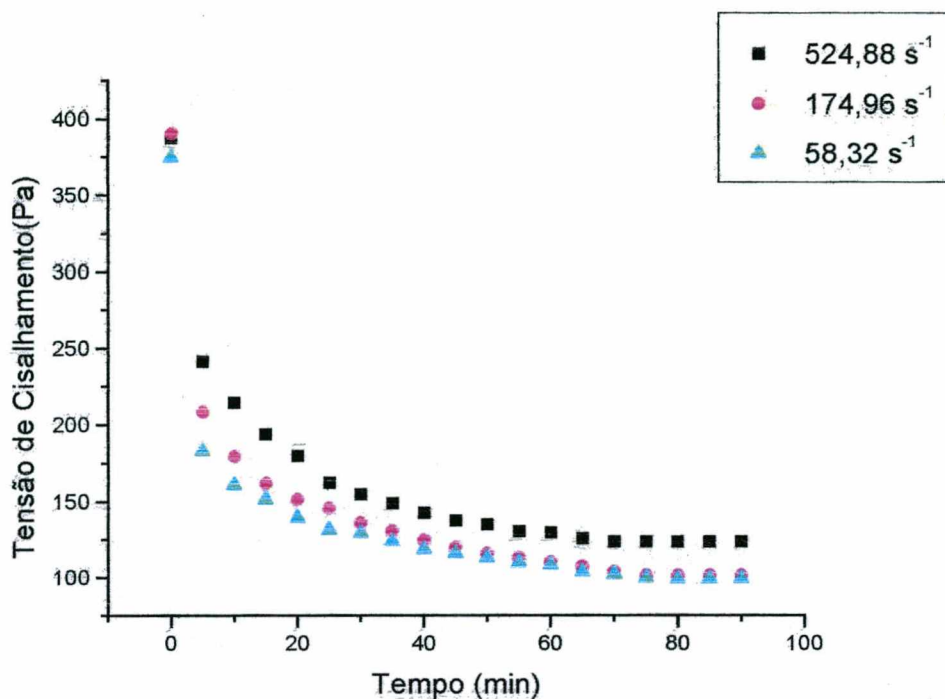


Figura 4.20 – Determinação da tensão de cisalhamento em diferentes taxas de deformação para a amostra F.

Os tixogramas apresentam duas seções distintas. Verifica-se uma diminuição mais acentuada da tensão de cisalhamento nos primeiros 10 minutos, portanto mais sensível ao tempo. Posteriormente a queda tornou-se mais lenta, até atingir um valor de tensão constante.

Percebe-se maior diferença no comportamento da amostra E em relação às outras, sendo esta a que apresenta uma “ consistência suave “.

A partir dos dados obtidos de tensão de cisalhamento, em vários tempos a uma mesma taxa de deformação, fez-se uma regressão, de acordo com o modelo proposto por WELTMANN (1943), e obtiveram-se as constantes A1 e B1 deste modelo. Essas constantes foram calculadas através de regressão linear dos valores de tensão de cisalhamento e  $\ln$  do tempo.



Toda a parte de cálculo foi feita com o auxílio do software Estatística, que nos deu também, através dos parâmetros estatísticos o desvio padrão e o coeficiente de correlação, pelo ajuste dos dados do modelo.

Tabela 4.2 – Parâmetros do modelo de Weltman para as amostras C, D, E e F analisadas

<b>MODELO DE WELTMAN</b>			
Taxa de deformação (s <sup>-1</sup> )	A <sub>1</sub> (Pa)	B <sub>1</sub> (Pa . s <sup>-1</sup> )	r (-)
Amostra C			
58,33	334,26	29,888	0,9943
174,96	379,65	34,913	0,9640
524,88	389,97	35,252	0,9937
Amostra D			
58,33	377,59	40,586	0,9600
174,96	389,97	42,313	0,9767
524,88	389,97	41,190	0,8679
Amostra E			
58,33	202,01	9,0000	0,9600
174,96	393,68	29,121	0,9160
524,88	396,16	-	-
Amostra F			
58,33	374,49	32,827	0,9962
174,96	389,97	33,556	0,9888
524,88	387,29	30,650	0,9350

O modelo de Weltman apresentou bons resultados para descrever o decaimento da tensão de cisalhamento com o tempo. O parâmetro B<sub>1</sub>, que indica o rompimento da estrutura do iogurte com o tempo, foi adequadamente ajustado para todo o intervalo da curva, em cada uma das taxas de deformação estudada. A dificuldade encontrada surgiu no ajuste da curva  $\tau \times \gamma$  para a amostra E a 524,88 s<sup>-1</sup>, onde não foi possível a obtenção de B<sub>1</sub> que satisfizesse todo o intervalo. Esta curva

apresenta um decaimento gradual ao longo do tempo, sem mostrar a queda brusca nos primeiros 10 minutos de medida.

A vantagem do ajuste utilizando-se o modelo de Weltman é a sua grande simplicidade, sem apresentar parâmetros de equilíbrio, como o modelo de Hahn, ou a complexidade do modelo de De Kee et al., que inclui um parâmetro estrutural considerando os efeitos do tempo, seguindo uma equação cinética de ordem  $p$ .

## **5- CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

As amostras estudadas, adquiridas em prateleiras de supermercados, apresentaram comportamento tixotrópico, sendo os dados experimentais obtidos em um reômetro de cilindros concêntricos.

O modelo de Weltman se mostrou adequado para descrever o decaimento da tensão de cisalhamento com o tempo.

As curvas ascendente e descendente da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação foram modeladas com a equação da lei da potência ( Ostwald- de Waele ), tendo o modelo apresentado uma boa adequação aos dados experimentais.

O comportamento do teor de gordura não pôde ser convenientemente analisado na caracterização reológica; uma das amostras de iogurte apresenta consistência suave, com caráter bastante cremoso, diferindo em muito das demais amostras. Percebeu-se também, que amostras do mesmo produto podem apresentar alguma modificação na consistência, quando adquiridas em épocas diferentes, alterando, portanto, os resultados.

O equipamento de cilindros concêntricos não apresenta bons resultados para os dados experimentais obtidos a baixas taxas de deformação, acarretando variações nas tensões de cisalhamento obtidas. O reômetro rotacional de cone e placa seria o mais indicado pois a taxa de cisalhamento é constante ao longo da superfície do cone.

Todas as seis amostras de iogurte estudadas apresentaram um decaimento da tensão de cisalhamento nos primeiros 60 minutos, atingindo então uma tensão de equilíbrio.

Propõe-se que em trabalhos futuros o iogurte seja produzido no Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos ( PROFI ), onde todas as variáveis possam ser monitoradas, como por exemplo, teor de gordura, concentração de sólidos. Além disso pode-se estudar a adição de fibras ao iogurte e verificar como isto afeta as suas características reológicas.

Outros modelos devem ser analisados para a descrição reológica do iogurte , explorando adequadamente a tensão inicial de escoamento ( yield stress), pois quando em repouso percebe-se um comportamento semelhante, ou com tendência,

a um sólido. Pode-se utilizar o modelo de Herschel – Bulkley, por exemplo, neste caso.

Além disso, o modelo de Hahn pode ser adequado para a prescrição da diminuição da tensão de cisalhamento com o tempo, onde tornou-se necessária a determinação da tensão de equilíbrio.

A viscosidade de equilíbrio é outro parâmetro que deve ser analisado, podendo ser feita uma modelagem em função do teor de gordura.

Os dados experimentais obtidos neste trabalho ocorreram à temperatura de 6<sup>o</sup> C, e seria interessante uma análise do iogurte a diferentes temperaturas.

## **6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ABRAHAMSEN, R.K.; HOLMEN, T.B. Yogurt from hyperfiltrated evaporated milk and from milk with added milk powder. **Milchwissenschaft**, v. 35, p. 399 – 402, 1980.
- ABU-JDAYIL, B.; MOHAMEED, H. Experimental and modelling studies of the flow properties of concentrated yogurt as affected by the storage time. **Journal of Food Engineering**, v. 50, p. 359 – 365, 2000.
- AFONSO, I.M.; MAIA, J.M. Rheological monitoring of structure evolution and development in stirred yoghurt. **Journal of Food Engineering**, v. 42, p. 183 – 190, 1999.
- ARRUDA, B.M.L. **Tecnologia do Leite: Produção - industrialização e Análise**. São Paulo: Ed. Nobel S.A. 6ª edição, 277 – 285 p. 1976.
- BARNES, H.A.; HUTTON, J.F.; WALTERS, K. **An Introduction to Rheology**. London: Elsevier, Third Impression, Vol. 3. 1 - 35 p. 1989.
- BARNES, H.A.. Thixotropy – a review. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 70, n. 1, p. 1 - 33 p. 1997.
- BASAK, S.; RAMASWAMY, H.S. Simultaneous Evaluation of Shear Rate and Time Dependency of Stirred Yogurt Rheology as Influenced by Added Pectin and Strawberry Concentrate. **Journal Food Eng.** V. 21, p. 385 – 393, 1994.
- BELITZ, H.D.; GROSCH, W. **Química de los Alimentos**. Espanha: Ed. Acribia S.A., 2º edição, 537 – 585 p. 1992.

- BENEZECH, T.; MAINGONNAT, J.F. Characterization of the Rheological Properties of Yoghurt – A Review. **Journal of Food Engineering**, France, v. 21, n. 1, p. 447-471, 1994.
- BENEZECH, T.; MAINGONNAT, J.F. Flow properties of stirred yoghurt: structural parameters approach in describing time dependency. **Journal of Texture Studies**, e, v. 24, n. 1, p. 455 -473, 1993.
- BENEZECH, T.; MAINGONNAT, J.F. Flow properties of stirred yogurt: Modelling and influence of cooling conditions. In *Theoretical and Applied Rheological*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, p. 693 -695, 1992.
- BEZERRA, J.R.M.V. Comportamento Reológico da Polpa de Manga. 2000. 5-20 p. Tese (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas – Campinas.
- BHATTACHARYA, S. Flow behavior of cooked maize flour suspensions and applicability of mathematical models. **Journal Food Process Engineering**, v. 17, p. 263 – 278, 1994.
- BHATTACHARYA, S. Yield Stress and Time-dependent Rheological Properties of Mango Pulp. **Journal of Food Science**, v. 64, n. 6, p. 1029 – 1033, 1999.
- BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. *Transport Phenomena*. John Wiley & Sons, New York, 1960.
- BUTLER, F.; McNULTY, P. Time-dependent rheological characterization of buttermilk at 5° C. **Journal of Food Engineering**, Irlanda, v. 25, n. 1, p. 569 – 580, 1995.
- CASSON, N. A flow equation for pigment-oil suspensions of the printing ink type, in *Rheology of Disperse Suspensions*, Ed. C. C. Mill, Pergamon press, New York, 1959.

- CHENG, D.C.H. Thixotropy. **Int. J. Cosmetic Sci.**, V. 9, p. 91 – 151, 1987.
- CHHINNAN, M.S.; McWATTERS, K.H. Rheological characterization of grain legume pastes and effect of hydration time and water level on apparent viscosity. **Journal of Food Science**, V. 50, p. 1167 – 1171, 1985.
- COULTATE, T.P.; BIOL, M.I. Alimentos: Química de sus Componentes. Espanha: Ed. Acribia S.A., 69 – 85 p. 1984.
- DE KEE, D.; CODE, R.K.; TURCOTTE, G. Flow properties of time-dependent foodstuffs. **Journal Rheological**, v. 27, n. 6, p. 581 – 604, 1983.
- GASPARETTO, C.A. Comportamento Reológico dos Fluidos Reais. 1983. Tese ( Doutorado em Engenharia de Alimentos ) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade de São Carlos – São Paulo.
- GEHRKE, T. Reometria de suco concentrado de frutas. 1996. 52 p. Tese (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- GERAGHTY, R.; BUTLER, F. Viscosity characterization of a commercial yogurt at 5° C using a cup in bob and a vane geometry over a wide shear rate range. **Journal of Food Process Engineering**, Irlanda, v. 22, p. 1 – 10, 1998.
- GUINEE, T.P.; MULLINS, C.G. **Rheological and syneretic properties of yogurt stabilized with different dairy ingredients.** 2º Dairy Levy Symposium, Moorepark, Fermoy, Co.Cork, 1993.
- HARPER, J.C. Viscometric behaviour in relation to evaporation of fruit purees. **Food Technology**, v. 14, p. 557 – 561, 1960.
- HOLDSWORTH, S.D. Applicability of rheological models to the interpretation of flow and processing behaviour of fluid food products. **Journal of Texture Studies**, v. 2, n. 4, p. 393-418, 1971

KLUPSCH, H.J. Milchpulver in sauren Milchprodukten. Ergebnisse praxisbezogener Versuche. **Molkereitechnik**, v. 82/83, p. 133 – 142, 1989.

LEWIS, M.J. **Poepiedades Fisicas de los Alimentos y de los Sistemas de Procesado**. Ed. ACRIBIA, S.A., Espanha, p. 112 – 132, 1993.

MACKEY, K.L.; OFOLI, R.Y.; MORGAN, R.G. Rheological modeling of potato flour during extrusion cooking. **Journal Food Process Engineering**, v. 12, p. 1 – 11, 1989.

MEWIS, J. Thixotropy – a general review. **Journal Non – Newtonian Fluid Mech**, V. 6, p. 1 – 20, 1979.

MIZRAHI, S.; BERK, Z. Flow behaviour of concentrated orange juice: mathematical treatment. **Journal do Texture Studies**, v.3, n. 1, p. 69 – 79, 1971.

MODLER, H.W.; LARMOND, M.E.; LIN, C.S. Physical and sensory properties of yogurt stablized with milk proteins. **Journal Dairy Science**, v. 66, p. 422 – 429, 1983.

OZER, B.H.; BELL, A.S.; GRANDISON, R.K. Rheological properties of concentrated yoghurt. **Journal of Texture Studies**, v. 27, p. 67 – 69, 1997.

PORTER, J.W.G. **Leche y Productos Lacteos**. Editorial Acribia, Espanha, 1981.

RAMASWAMY, H.S.; BASAK, S. Pectin and Raspberry Concentrate Effects on the Rheology of Stirred Commercial Yogurt. **Journal of Food Science**, Canada, v.57, n. 2, p. 357 – 360, 1992.

RAMASWAMY, H.S.; BASAK, S. Rheology of Stirred Yogurt. **Journal Texture Studies**, v.22, n. 2, p. 231 – 241, 1991.



- RAO, M.A. Rheology of fluid foods. In: RAO, M.A; RIZVI, S.S.H. (eds), **Engineering Properties of Foods**, p. 1-47, MARCEL DEKKER, New York, **Food Science and Technology** , series, n. 19, 1981.
- RAO, M.A.; COOLEY, H.J. Applicability of Flow Models with Yield for Tomato Concentrates. **Journal of Food Process Engineering**, v. 6, n. 3, p. 159 – 173, 1982.
- RAO, M.A.; RIZVI, S.S. **Engineering Properties of Foods**, New York, Marcel Dekker, 1986.
- ROHM, H. Viscosity determination of stirred yoghurt. **Lebensm. – Wis. U.- Technol.**, V. 25, p. 297 – 301, 1992.
- SCHRAMM, G. **Introduction to Practical Viscometry**. Germany: Gebrueder HAAKE, p. 116, 1981.
- SHAKER, R.R.; JUMAH, R.Y.; ABU-JDAYIL, B. Rheological properties of plain yogurt during coagulation process: impact of fat content and preheat treatment of milk. **Journal of Food Engineering**, v. 44, p. 175 – 180. 1999.
- SKELLAND, A.H.P. **Non-Newtonian flow and heat transfer**. New York, John Wiley & Sons, p. 469, 1967.
- SOKOLOW, W.A.A. et al. **Fabricación de Productos Lácteos**. Ed. Acribia, Zaragoza, Espanha, 1980.
- SPREER, E. **Lactologia Industrial**. Espanha: Ed. Acribia, 2º edição, p. 229 – 236 , 1991.
- STEVENTON, A.J.; PARKINSON, C.J. The rheology of yogurt. In **Rheology of Food, Pharmaceutical, and Biological Materials with General Rheology**, Ed. R. E. Carter, Elsevier Applied Science, London, p. 196 – 210, 1990.

TAMIME, A.Y.; DEETH, H.C. YOGURT: Technology and biochemistry. **Journal Food Protect.** V. 43, p. 939 – 977. 1980.

TIU, C.; BOGER, D.V. Complete rheological characterization of time-dependent food products. **Journal of Texture Studies**, v. 5, p. 329 – 338, 1974.

TUNG, M.A.; RICHARDS, J.F.; MORRISON, B.C. Rheological of fresh, aged and gamma irradiated egg white. **Journal of Food Science**, v. 35, p. 872 – 874, 1970.

VAN WAZER, R.J.; LYONS, J.W.; KIM, K.I.; COLWELL, R.E. Viscosity and flow measurement: a laboratory hadbrook of rheology. New York, **In terscience Publishers**, p. 406. 1963.

VEISSEYRE, R. **Recogida, Tratamento y Transformacion de la Leiche en Paisés Templas dos y Calientes**. Espanha: Ed. Acribia, 2º edição, p. 229 – 236, 1972.

WELTMANN, R.N. Breakdown of thixotropic structure as function of time. **Journal of Applied Physics**, v. 14, p. 343 – 350, 1943.

**ANEXOS**

Dados experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação que gerou a figura 4.1:

$\dot{\gamma} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	Amostra A		Amostra B	
	$\tau \text{ (Pa)}$	$\eta \text{ (mPa.s)}$	$\tau \text{ (Pa)}$	$\eta \text{ (mPa.s)}$
0,3990	82,430	20659,1	82,430	20659,2
0,7200	84,300	11708,3	87,110	12098,6
1,2000	91,790	7649,17	94,130	7844,17
2,1600	103,03	4769,91	104,91	4856,94
3,6000	147,99	4110,83	131,13	3642,50
6,4800	256,65	3960,65	177,97	2746,45
10,800	292,24	2705,92	224,80	2081,48
19,440	369,98	1903,19	292,24	1503,29
32,400	443,04	1367,41	322,21	994,470
58,320	518,91	889,760	372,79	639,210
97,200	578,86	595,530	410,26	422,080
174,96	599,17	342,630	454,28	259,650
97,200	388,72	222,180	316,59	325,710
58,320	309,10	530,000	245,41	420,800
32,400	252,90	780,550	201,38	621,540
19,440	219,18	1127,47	170,47	876,900
10,800	174,22	1613,15	142,37	1318,24
6,4800	157,36	2428,39	118,02	1821,30
3,6000	112,40	3122,22	103,97	2888,05
2,1600	84,300	3902,78	84,300	3902,78
1,2000	56,200	4683,33	58,070	4839,17
0,7200	47,770	6634,72	47,770	6634,72
0,3990	34,660	8686,72	34,660	8686,72

Dados experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação que gerou a figura 4.2:

$\dot{\gamma}$ (s <sup>-1</sup> )	Amostra C		Amostra D	
	$\tau$ (Pa)	$\eta$ (mPa.s)	$\tau$ (Pa)	$\eta$ (mPa.s)
0,3990	11,24	2817,0	56,200	14085,21
0,7200	22,48	31,222	49,640	6984,44
1,2000	31,85	2654,2	54,330	4527,50
2,1600	52,55	2432,9	58,070	2688,42
3,6000	75,03	2084,2	86,170	2393,61
6,4800	89,08	1374,7	136,75	2110,34
10,800	110,43	1022,5	160,17	1483,05
19,440	138,53	712,60	190,14	978,080
32,400	168,60	520,37	218,24	673,580
58,320	212,72	364,75	250,93	430,260
97,200	245,31	252,38	281,00	289,090
174,96	295,89	169,12	309,10	176,670
97,200	185,46	190,80	187,33	192,730
58,320	129,26	221,64	142,37	244,120
32,400	96,38	297,47	116,15	358,490
19,440	80,65	414,87	108,65	558,900
10,800	64,63	598,42	89,920	832,590
6,4800	56,20	867,28	80,550	1243,05
3,6000	50,58	1405,0	61,820	1717,22
2,1600	39,34	1821,3	48,710	2255,09
1,2000	28,10	2341,7	39,340	3278,33
0,7200	19,67	2731,9	29,970	4162,50
0,3990	5,62	1411,0	28,100	7042,61

Dados experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação que gerou a figura 4.3:

$\dot{\gamma}$ (s <sup>-1</sup> )	Amostra E		Amostra F	
	$\tau$ (Pa)	$\eta$ (mPa.s)	$\tau$ (Pa)	$\eta$ (mPa.s)
0,3990	16,860	4225,56	73,060	18310,8
0,7200	26,133	3629,58	82,430	11448,6
1,2000	31,753	2646,11	86,267	7188,92
2,1600	49,737	2302,64	105,84	4900,00
3,6000	72,217	2006,03	138,63	3850,80
6,4800	117,18	1808,29	182,65	2818,67
10,800	152,58	1412,80	227,61	2107,50
19,440	185,46	954,010	288,49	1484,00
32,400	207,94	641,790	332,52	1026,29
58,320	253,74	435,080	404,64	693,830
97,200	290,27	298,630	464,59	477,970
174,96	379,35	216,820	522,66	298,730
97,200	264,14	271,750	365,30	375,820
58,320	220,02	377,270	271,63	465,760
32,400	180,68	557,660	196,70	607,100
19,440	158,20	813,800	170,74	878,290
10,800	132,91	1230,67	144,25	1335,65
6,4800	112,40	1734,57	123,64	1908,02
3,6000	90,760	2521,11	112,40	3122,22
2,1600	71,093	3291,34	84,300	3902,78
1,2000	44,960	3746,67	67,440	5620,00
0,7200	32,880	4566,67	52,550	7298,61
0,3990	19,670	4929,82	32,780	8215,54

Dados experimentais da tensão de cisalhamento em função do tempo em diferentes taxas de deformação que gerou as figuras 4.17 e 4.18:

Amostra C					Amostra D				
Tempo ( min )	$\gamma = 524,88 \text{ S}^{-1}$	$\gamma = 174,96 \text{ S}^{-1}$	$\gamma = 58,32 \text{ S}^{-1}$	$\gamma = 524,88 \text{ S}^{-1}$	$\gamma = 174,96 \text{ S}^{-1}$	$\gamma = 58,32 \text{ S}^{-1}$	$\gamma = 524,88 \text{ S}^{-1}$	$\gamma = 174,96 \text{ S}^{-1}$	$\gamma = 58,32 \text{ S}^{-1}$
	$\tau$ ( Pa )					$\tau$ ( Pa )			
0	389,97	379,65	334,26	389,97	389,97	334,26	389,97	389,97	377,59
5	199,52	170,22	173,32	146,52	145,46	133,8	146,52	145,46	133,8
10	164,03	148,56	146,50	111,42	114,51	106,78	111,42	114,51	106,78
15	148,56	134,73	130,40	92,85	93,78	95,33	92,85	93,78	95,33
20	141,34	124,11	120,70	82,51	80,47	81,71	82,51	80,47	81,71
25	133,08	120,07	114,93	74,71	73,66	74,28	74,71	73,66	74,28
35	121,74	114,51	108,53	69,51	68,09	70,25	69,51	68,09	70,25
35	116,99	110,39	105,23	65,61	62,52	66,85	65,61	62,52	66,85
40	113,90	108,94	100,69	62,70	59,73	61,80	62,70	59,73	61,80
45	109,77	104,20	96,56	61,47	55,71	56,95	61,47	55,71	56,95
50	105,64	102,13	94,29	59,42	52,61	55,71	59,42	52,61	55,71
55	103,78	99,04	90,17	56,51	50,14	54,47	56,51	50,14	54,47
60	101,10	96,56	89,14	55,71	49,52	50,14	55,71	49,52	50,14
65	100,28	96,15	87,90	55,71	48,28	49,21	55,71	48,28	49,21
70	96,28	93,88	84,18	55,71	44,57	46,42	55,71	44,57	46,42
75	94,50	92,85	82,12	55,71	43,33	45,80	55,71	43,33	45,80
80	92,85	92,44	81,09	55,71	43,33	45,80	55,71	43,33	45,80
85	92,85	92,44	80,06	55,71	43,33	45,80	55,71	43,33	45,80
90	92,85	92,44	80,06	55,71	43,33	45,80	55,71	43,33	45,80

Dados experimentais da tensão de cisalhamento em função do tempo em diferentes taxas de deformação que gerou as figuras 4.19 e 4.20

Amostra E					Amostra F				
Tempo (min.)	$\gamma = 524,88 \text{ S}^{-1}$	$\gamma = 174,96 \text{ S}^{-1}$	$\gamma = 58,32 \text{ S}^{-1}$	$\gamma = 174,96 \text{ S}^{-1}$	$\gamma = 524,88 \text{ S}^{-1}$	$\gamma = 58,32 \text{ S}^{-1}$	$\gamma = 174,96 \text{ S}^{-1}$	$\gamma = 58,32 \text{ S}^{-1}$	
	$\tau$ (Pa)					$\tau$ (Pa)			
0	396,16	393,68	202,21	389,97	387,29	202,21	389,97	374,49	
5	356,96	270,71	164,03	208,42	241,41	164,03	208,42	183,22	
10	311,56	236,04	153,72	179,51	214,59	153,72	179,51	160,94	
15	281,64	215,00	149,60	161,97	193,95	149,60	161,97	151,65	
20	261,63	199,11	142,78	151,65	179,51	142,78	151,65	139,27	
25	244,50	187,76	139,27	145,46	161,97	139,27	145,46	131,54	
35	228,00	178,68	135,35	136,18	154,75	135,35	136,18	129,37	
35	218,71	173,32	132,05	130,42	148,56	132,05	130,42	123,80	
40	208,40	165,48	127,93	124,83	142,37	127,93	124,83	118,23	
45	201,17	159,91	124,83	119,67	137,62	124,83	119,67	115,75	
50	193,95	155,16	121,74	115,55	134,94	121,74	115,55	112,97	
55	189,21	151,45	120,50	113,07	130,20	120,50	113,07	109,87	
60	184,67	146,49	116,78	109,97	129,58	116,78	109,97	108,32	
65	178,89	143,40	115,55	107,29	125,66	115,55	107,29	103,68	
70	174,97	140,31	114,10	103,58	123,80	114,10	103,58	102,13	
75	169,19	139,27	111,42	101,10	123,80	111,42	101,10	99,66	
80	166,92	135,15	109,36	101,10	123,80	109,36	101,10	99,04	
85	163,42	133,70	109,36	101,10	123,80	109,36	101,10	99,04	
90	161,97	132,67	109,36	101,10	123,80	109,36	101,10	99,04	