

CAIO EDUARDO PERES THOMAZ

REOLOGIA E HIDRODINÂMICA DO
ESCOAMENTO DE OVO LÍQUIDO



1910001043



CAIO EDUARDO PERES THOMAZ

CAIO EDUARDO PERES THOMAZ

REOLOGIA E HIDRODINÂMICA DO
ESCOAMENTO DE OVO LÍQUIDO

REOLOGIA E HIDRODINÂMICA DO ESCOAMENTO DE OVO LÍQUIDO

Dissertação apresentada ao Instituto de
Biodiversidade, Letras e Ciências Exatas da
Universidade Estadual Paulista "Júlio de
Mesquita Filho", Campus de São José do Rio
Prato, para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia e Ciências de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Javier Teles Romero
Co-Orientadora: Profa. Dra. Vânia Regina Nicolati Teis



São José do Rio Prato

2022

CAIO EDUARDO PERES THOMAZ

**REOLOGIA E HIDRODINÂMICA DO
ESCOAMENTO DE OVO LÍQUIDO**

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

Orientador: Prof. Dr. Javier Telis Romero
Co-Orientadora: Profa. Dra. Vânia Regina Nicoletti Telis



São José do Rio Preto
2002

xerocada



4664
T455r

50702009

CAIO EDUARDO PERES THOMAZ

REOLOGIA E HIDRODINÂMICA DO
ESCOAMENTO DE OVO LÍQUIDO

Thomaz, Caio Eduardo Peres.

Reologia e hidrodinâmica do escoamento de ovo líquido / Caio Eduardo Peres Thomaz. – São José do Rio Preto : [s.n.], 2002.
107 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Javier Telis-Romero.

Co-Orientadora: Vânia Regina Nicoletti Telis.

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

1. Parâmetros reológicos. 2. Ovo líquido. 3. Reologia. 4. Modelo Newtoniano. 5. Comportamento pseudoplástico. 6. Engenharia de Alimentos. I. Telis-Romero, Javier. II. Universidade Estadual Paulista. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. III. Título.

CDU - 664

CAIO EDUARDO PERES THOMAZ

CAIO EDUARDO PERES THOMAZ

**REOLOGIA E HIDRODINÂMICA DO
ESCOAMENTO DE OVO LÍQUIDO**

1994/1996

Curso de Graduação

Engenharia de Alimentos

UNESP - São José do Rio Preto/SP

1999/2002

Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência

de Alimentos, nível de mestrado

COMISSÃO JULGADORA

TESE PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE

Presidente e Orientador

2º Examinador

3º Examinador

São José do Rio Preto, de de 2002.



DADOS CURRICULARES

CAIO EDUARDO PERES THOMAZ

NASCIMENTO	25.03.1976
FILIAÇÃO	Edson Maragno Thomaz Maria da Glória Peres Thomaz
1994/1998	Curso de Graduação Engenharia de Alimentos UNESP – S. J. Rio Preto/SP
1999/2002	Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, nível de mestrado UNESP – S. J. Rio Preto/SP

Aos meus pais Edson e Glória
por tudo que me ofereceram, pela
vida maravilhosa que sempre me
proporcionaram, pela confiança,
pelo carinho e pelo amor. Ao meu
irmão, meu fiel companheiro.

Aos meus pais Edson e Glorinha,
por tudo que me ofereceram, pela
vida maravilhosa que sempre me
proporcionaram, pela confiança,
pelo carinho e pelo amor. Ao meu
irmão, meu fiel escudeiro.

AGRADECIMENTOS

A Deus que, apesar de todos os meus erros, nunca me abandona.

Ao Prof. Dr. Javier Telis Romero, pela orientação nos estudos a qualquer dia, hora e local. Pela irrestrita confiança e carinho, pelo incansável apoio e pelo entendimento de minha vida.

À Profª Vânia Regina Nicoletti Telis, pelo imenso apoio oferecido.

Ao Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos (DETA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP) por me permitir cursar e obter este título nesta honrosa instituição.

Aos professores integrantes da banca examinadora, Dr. Luis Antonio Minim, Dr. José Antonio Vieira, pelas correções e sugestões apresentadas neste trabalho.

À Profª Dra. Jane Selia dos Reis Coimbra pelo fornecimento de alguns dados utilizados neste trabalho.

Ao acadêmico Marco A. Pollizelli ajuda na coleta dos dados experimentais e ao técnico João Jesuíno Demílio pelo auxílio na montagem dos experimentos.

À amiga Ana Lúcia Gabas, pelo companheirismo, estímulo e parceria profissional.

Aos Colégios: XIV de Agosto-Objetivo (Mirandópolis – SP), Cursinho Objetivo (Andradina – SP), a seus diretores e funcionários, pela compreensão e apoio para a conclusão deste trabalho.

Ao meu querido Cursinho Alternativo, todos seus coordenadores, que tiveram a paciência de me “esperar”, aos professores e funcionários, que nunca me negaram apoio e a toda “Família Alternativa”.

À coordenação de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos pela colaboração.

À FAPESP, processo nº 98/08738-7, pela aquisição de alguns equipamentos e materiais utilizados na realização deste trabalho.

Aos todos meus amigos de Rio Preto, à Confraria e aos “Urso” de Ipaussu.

A você, Eliana, por toda a paciência e carinho.

A toda minha família e tios por todo apoio e preocupação.

À minha avó, Dona Yolanda, que sempre me incentivou a estudar e nunca parar.

Ao meu irmão, Edson, exemplo de responsabilidade e caráter.

Aos meus pais, obrigado mais uma vez.

A todos que, de alguma forma, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. MATERIAL

2.1.1. DETERMINAÇÃO DO TIPO DE SOLIDOS

2.1.2. REAGENTES

2.1.3. EQUIPAMENTOS

2.1.4. PROCEDIMENTOS

2.1.5. DETERMINAÇÃO DO TIPO DE SOLIDOS

2.1.6. DETERMINAÇÃO DO TIPO DE SOLIDOS

2.1.7. DETERMINAÇÃO DO TIPO DE SOLIDOS

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE TABELAS	13
NOMENCLATURA	15
RESUMO	18
ABSTRACT	20
1. INTRODUÇÃO	22
1.1. MERCADO	22
1.2. REOLOGIA.....	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1. PROCESSAMENTO DE OVO DESIDRATADO, RESFRIADO E CONGELADO..	28
2.2. REOLOGIA DE FLUIDOS ALIMENTÍCIOS	32
2.2.1. FLUIDOS VISCOSOS INDEPENDENTES DO TEMPO	32
2.2.2. FLUIDOS VISCOSOS DEPENDENTES DO TEMPO.....	43
2.2.3. FLUIDOS VISCOELÁSTICOS	45
2.3. ESCOAMENTO LAMINAR DE FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS EM DUTOS CIRCULARES	46
3. MATERIAL E MÉTODOS	51
3.1. MATERIAL	51
3.2. DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS.....	51
3.3. REOLOGIA.....	52
3.3.1. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS REOLÓGICOS	52
3.3.2. OPERAÇÃO DO REÔMETRO	53
3.3.3. DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO E TAXA DE DEFORMAÇÃO	54
3.3.4. CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE OSTWALD-DE WAELE	63
3.4. MEDIDAS DE QUEDA DE PRESSÃO	63

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1. REOLOGIA DE MISTURAS GEMA/CLARA.....	66
4.2. COMPORTAMENTO REOLÓGICO TIXOTRÓPICO.....	68
4.3. COMPORTAMENTO REOLÓGICO PSEUDOPLÁSTICO	70
4.4. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NOS PARÂMETROS REOLÓGICOS.....	74
4.5. INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO DE ÁGUA NOS PARÂMETROS REOLÓGICOS.....	81
4.6. EFEITO COMBINADO DA TEMPERATURA E FRAÇÃO DE ÁGUA NOS PARÂMETROS REOLÓGICOS DO FLUIDO	88
4.7. HIDRODINÂMICA DO ESCOAMENTO DE GEMA DE OVO DURANTE O RESFRIAMENTO	94
5. CONCLUSÕES	100
6. SUGESTÕES	102
7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Fluxograma do processo de produção de ovo desidratado	31
Figura 2.2: Tensões atuando no elemento de um fluido qualquer.....	47
Figura 3.1: Reômetro rotacional de cilindros concêntricos: a) vista lateral b) vista superior.....	53
Figura 3.2: Elemento diferencial de volume $r\Delta\phi\Delta r\Delta z$ para os balanços de massa e quantidade de movimento no reômetro rotacional	55
Figura 3.3: Diagrama do equipamento utilizado para as medidas de queda de pressão	65
Figura 4.1: Influência da fração de água na tixotropia de misturas gema/clara na temperatura de 275 K	69
Figura 4.2: Influência da fração de água na tixotropia de misturas gema/clara na concentração de $X_w = 0,62$	70
Figura 4.3: Representação do comportamento reológico de misturas gema/clara pelo modelo de Ostwald-De Waele na tensão máxima.....	72
Figura 4.4: Representação do comportamento reológico de misturas gema/clara pelo modelo de Ostwald-De Waele na tensão de equilíbrio	72
Figura 4.5: Ajuste do modelo exponencial (eq. 4.1) para misturas gema/clara com diferentes teores de água (Índices de consistência ajustados com valores de tensão de cisalhamento de equilíbrio).....	76
Figura 4.6: Ajuste do modelo exponencial (Eq. 4.1) para misturas gema/clara em diferentes teores de água (Índices de consistência ajustados com valores de tensão de cisalhamento máxima).....	77
Figura 4.7: Efeito da temperatura sobre o índice de comportamento para diferentes teores de água – ajuste da equação (4.2) com valores de tensão de cisalhamento de equilíbrio.....	79

Figura 4.8: Efeito da temperatura sobre o índice de comportamento para diferentes teores de água – ajuste da equação (4.2) com valores de tensão de cisalhamento máxima	80
Figura 4.9 Ajuste do modelo exponencial (eq. 4.3) para misturas gema/clara em diferentes teores de água (índices de consistência ajustados com valores de tensão de cisalhamento de equilíbrio).	83
Figura 4.10: Ajuste do modelo exponencial (eq. 4.3) para misturas gema/clara em diferentes teores de água (índices de consistência, ajustados com valores de tensão de cisalhamento máxima)	84
Figura 4.11: Ajuste do modelo exponencial (eq. 4.4) para misturas gema/clara em diferentes teores de água (índices de comportamento do fluido ajustados com valores de tensão de cisalhamento de equilíbrio).....	86
Figura 4.12: Ajuste do modelo exponencial (eq. 4.4) para misturas gema/clara em diferentes teores de água (índices de comportamento do fluido ajustados com valores de tensão de cisalhamento máxima).....	87
Figura 4.13: Correlação entre resultados experimentais e valores estimados para o índice de consistência do fluido (eq. 4.6)... ..	90
Figura 4.14: Influência da temperatura e da fração de água no índice de consistência da mistura gema/clara para o modelo de Ostwald-De Waele (tensões de cisalhamento de equilíbrio).	90
Figura 4.15: Influência da temperatura e da fração de água no índice de consistência da mistura gema/clara para o modelo de Ostwald-De Waele (tensões de cisalhamento máxima).....	91
Figura 4.16: Correlação entre resultados experimentais e valores estimados para o índice de comportamento do fluido (eq. 4.7).	92
Figura 4.17: Influência da temperatura e da fração de água no índice de comportamento das mistura gema/clara (tensões de cisalhamento de equilíbrio).	93

Figura 4.18: Influência da temperatura e da fração de água no índice de comportamento da mistura gema/clara para o modelo de Ostwald-De Waele (tensões de cisalhamento máximas).....93

Figura 4.19: Fatores de atrito experimentais e preditos para gema de ovo utilizando os parâmetros reológicos do modelo de Ostwald-De Waele ignorando seu comportamento tixotrópico.98

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1: Produção de ovos líquidos e desidratados durante o ano de 1995..	23
Tabela 1.2: Distribuição da produção de ovos no ano de 1995.....	24
Tabela 1.3: Mercados consumidores de ovo líquido e respectivas porcentagens ..	
.....	25
Tabela 4.1: Teor de água das amostras em função das diferentes proporções de clara-gema.....	66
Tabela 4.2: Parâmetros reológicos para a mistura de gema/clara em diferentes frações de água e temperaturas – tensão de cisalhamento de equilíbrio.	73
Tabela 4.3: Parâmetros reológicos para a mistura de gema/clara em diferentes frações de água e temperaturas – tensão de cisalhamento máxima.	73
Tabela 4.4: Parâmetros da Equação (4.1) e coeficientes de correlação para os índices de consistência determinados com as tensões de cisalhamento de equilíbrio.....	77
Tabela 4.5: Parâmetros da Equação (4.1) e coeficientes de correlação para os índices de consistência determinados com as tensões de cisalhamento máximas.....	78
Tabela 4.6: Parâmetros da equação (4.2) e coeficientes de correlação para os índices de comportamento do fluido determinados com as tensões de cisalhamento de equilíbrio.....	81
Tabela 4.7: Parâmetros da equação (4.2) e coeficientes de correlação para os índices de comportamento do fluido determinados com as tensões de cisalhamento máximas.....	81
Tabela 4.8: Parâmetros da equação (4.3) e coeficientes de correlação para os índices de consistência do fluido determinados com as tensões de cisalhamento de equilíbrio.....	84

Tabela 4.9: Parâmetros da equação (4.3) e coeficientes de correlação para os índices de consistência do fluido, determinados com as tensões de cisalhamento máximas.....	85
Tabela 4.10: Parâmetros da equação (4.4) e coeficientes de correlação para os índices de comportamento do fluido determinados com as tensões de cisalhamento de equilíbrio.....	87
Tabela 4.11: Parâmetros da equação (4.4) e coeficientes de correlação para os índices de comportamento do fluido determinados com as tensões de cisalhamento máxima	88

NOMENCLATURA

- a = parâmetro reológico do modelo de Sisko, $[F.L^2.\theta]$
- b = parâmetro reológico do modelo de Sisko, $[F.L^2.\theta^{-1}]$
- c = parâmetro reológico do modelo de Sisko, adimensional
- A = parâmetro reológico do modelo de Prandtl-Eyring e Powell-Eyring, $[F.L^{-2}]$
- B = parâmetro reológico do modelo de Prandtl-Eyring, e Powell-Eyring, $[\theta^{-1}]$
- D = Diâmetro do tubo, $[L]$
- E_a = energia de ativação, $[H.mol^{-1}.T^{-1}]$
- f = fator de atrito de fanning, adimensional
- g = aceleração gravitacional, $[L.\theta^{-2}]$
- L, h = altura do cilindro, $[L]$
- K = índice de consistência, $[F.\theta^n]$
- K_∞ = fator pré-exponencial, $[F.\theta^n]$
- n = índice de comportamento do fluido, adimensional
- p = pressão do fluido, $[F.L^{-2}]$
- Re_g = número de Reynolds generalizado, adimensional
- R = constante universal dos gases ($R = 1,987 \text{ cal/mol K}$), $[H.M^{-1}.\theta^{-1}]$
- R = Raio do tubo, $[L]$
- R_b = raio do cilindro, $[L]$
- R_c = raio do copo, $[L]$
- r = raio, $[L]$
- T = temperatura absoluta, $[T]$
- T = torque, $[F.L]$
- t = tempo, $[\theta]$
- v = velocidade do fluido, $[L.\theta^{-1}]$
- X_w = fração de água na mistura de ovo, adimensional

Letras Gregas

ΔP = queda de pressão no tubo, [FL⁻²]

α = parâmetro reológico do modelo de Ellis, adimensional

α = parâmetro reológico do modelo de Cross, [$\theta^{2/3}$]

λ = parâmetro estrutural da relação de Moore, adimensional

τ = tensão de cisalhamento, [FL⁻²]

τ_p = tensão de cisalhamento na parede, [FL⁻²]

τ_0 = tensão inicial de escoamento do modelo de Bingham ou Herschel-Bulkley, [FL⁻²]

τ_s = parâmetro reológico do modelo de Reiner-Philippoff, [FL⁻²]

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação, [θ^{-1}]

μ = viscosidade do fluido, [FL⁻² θ]

μ_∞ = parâmetro reológico do modelo de Reiner-Philippoff, ou viscosidade aparente na taxa de deformação infinita no modelo de Cross e Meter, [FL⁻² θ]

μ_0 = parâmetro reológico do modelo de Reiner-Philippoff, ou viscosidade aparente na taxa de deformação zero no modelo de Cross e Meter, [FL⁻² θ]

η_B = viscosidade plástica de Bingham, [FL⁻² θ]

ϕ_0 = parâmetro reológico do modelo de Ellis, [L² θ^{-1} F⁻¹]

ϕ_1 = parâmetro reológico do modelo de Ellis, [L⁴ θ^{-1} F⁻²]

ε = constante da equação (3.10), adimensional

ρ = densidade do fluido, [M.L⁻³]

ω = velocidade angular do fluido, [L. θ^{-1}]

Ω = velocidade angular de rotação do cilindro, [L. θ^{-1}]

Sub-índices

a = aparente

r = direção radial

RESUMO

n = componente

o = inicial

z = direção longitudinal

w = água

ϕ = direção angular



RESUMO

O ovo é um dos alimentos mais consumidos no mundo e as indústrias envolvidas em seu processamento têm uma importante participação no setor alimentício. A grande aceitação de ovos e seus derivados pode ser atribuída a seu alto valor nutritivo, o qual está relacionado ao elevado conteúdo de proteínas, vitaminas, lipídeos e minerais. O processamento industrial produz ovo líquido integral, gema, clara e misturas com várias proporções destes componentes, com o objetivo de atender indústrias de massas alimentícias, de produtos de panificação, restaurantes industriais e outros fins institucionais. A indústria de derivados de ovos faz uso de operações unitárias como bombeamento, pasteurização, resfriamento, congelamento e secagem por spray, de forma que o conhecimento do comportamento reológico dos produtos envolvidos e sua dependência com a temperatura é essencial para o adequado projeto dos equipamentos. Neste trabalho foi estudado o efeito de diferentes proporções de gema e clara de ovo nos parâmetros reológicos. Os fluidos apresentaram comportamento tixotrópico e, para contornar esse problema, optou-se por obter parâmetros reológicos correspondentes às tensões máximas e de equilíbrio, utilizando o modelo de Ostwald-De Waele para fluidos com reologia independente do tempo. Os efeitos da temperatura e da fração de água sobre os parâmetros reológicos do fluido, bem como os efeitos combinados dessas variáveis, tanto para tensões máximas como de equilíbrio, pôde ser representado

por funções exponenciais. Além do comportamento reológico, fatores de atrito experimentais foram determinados durante o resfriamento de gema de ovo através de tubos, os quais foram satisfatoriamente reproduzidos pelo uso de equações análogas à equação de Hagen-Poiseuille, para escoamento laminar, e à equação de Dodge & Metzner para o escoamento turbulento. Foi demonstrado que a utilização de modelos empíricos para a determinação de fatores de atrito em fluidos que apresentam comportamento reológico dependente do tempo deve ser feita com base em parâmetros determinados a partir da tensão de cisalhamento máxima, os quais levam a maiores fatores de atrito e à escolha de bombas de maior potência.

ABSTRACT

Egg is one of the most consumed food products in the world and egg industries have an important participation in the food industry segment. The great acceptance of eggs and egg products can be attributed to their high nutritional value, which is related to a high protein, vitamins, lipids and mineral content. Industrial processing gives liquid whole egg, egg yolk, egg white and mixtures with different proportions of these components, with the objective of supplying baking, confectionery and ice cream industries, food services and others. The egg processing industry employs unit operations such as pumping, pasteurization, cooling, freezing and spray drying, and knowledge of the rheological behavior of the involved products, including its temperature dependence, is essential for the adequate equipment design. In this work, the effect of different proportion of egg yolk and white on the rheological parameters was studied. Thixotropic behavior was detected and, as a manner of bypassing this problem, rheological parameters corresponding to the maximum and equilibrium shear stresses were obtained by using the Ostwald-De Waele model, which is appropriated to fluids with time-independent rheological properties. Temperature and water fraction effects on the rheological parameters, as well as the combined effect of these variables for both the maximum and equilibrium shear stresses, could be adequately represented by exponential functions. In addition to the rheological behavior, experimental friction factors were determined during cooling of

egg yolk flowing in tubes, which were well fitted by equations analogous to the Hagen-Poiseuille equation for laminar flow, and Dodge & Metzner equation for turbulent flow. It was shown that friction factors evaluation for fluids with time-dependent rheological behavior by using empirical models should be based on parameters obtained from the maximum shear stress, which leads to higher friction factors and to higher power pumps.



1. INTRODUÇÃO

1.1. Mercado

O ovo é um dos produtos alimentícios mais consumidos no mundo: só nos Estados Unidos a produção de ovos em 1999 foi de aproximadamente 193 milhões de ovos. O seu processamento industrial não é novo, já que a desidratação de ovo começou em 1878 na região central dos EUA e a industrialização de ovo líquido começou por volta de 1890. As primeiras patentes do processo de desidratação de ovos nos Estados Unidos datam do início deste século, mas os produtos obtidos apresentavam baixa qualidade e pouco interesse. O crescimento da produção de ovos pasteurizados ocorreu a partir da Segunda Guerra Mundial, sendo que no Brasil a utilização de ovos desidratados data da década de 50 e a industrialização iniciou-se em 1975, com a construção da primeira fábrica, a Sohovos, situada em Sorocaba - SP.

Atualmente no Brasil estão instaladas as seguintes empresas produtoras de ovos pasteurizados: Ito Avicultura, Dinapro, Salto's, Sohovos, Mizumoto e Kayatonas, sendo que as três últimas têm sua produção voltada para a fabricação de ovos desidratados, utilizando a pasteurização apenas como uma etapa intermediária do processamento.

No panorama mundial existem de 1000 a 1200 máquinas quebradeiras de ovos, industrializando aproximadamente 375.000



toneladas de ovos, que representam 15% do total da produção de ovos in natura.

Os EUA são os maiores produtores, com 64 plantas de processamento de ovos líquidos e 22 de desidratados, representando 25% da sua produção de ovos in natura (Tonzar et al., 1997).

No Brasil, a produção de ovos in natura, em 1995 foi de 44,6 milhões de caixas de ovos de 30 dúzias, entre ovos brancos e vermelhos, 19% maior que em 1994. Deste total, 5% foram industrializados, contabilizando um volume de 40.140 toneladas de ovos pasteurizados na forma líquida e desidratada, divididos conforme a tabela a seguir:

Tabela 1.1 Produção de ovos líquidos e desidratados durante o ano de 1995.

	OVO LÍQUIDO		OVO DESIDRATADO	
	Ton./ano	Caixas Processadas/ano	Ton./ano	Caixas Processadas/ano
Integral	19.200	1.066.666	3.600	860.000
Gema	1.080	166.000	360	138.000
Clara	1.920		192	
Total	22.200	1.232.666	4.152	998.000

Obs: Cada caixa contém 360 ovos in natura

Fonte: Tonzar et al. (1997)

Todas as fábricas de processamento de ovos localizam-se no Estado de São Paulo, que é o principal produtor de ovos in natura do Brasil, conforme podemos observar na tabela 1.2.

Tabela 1.2. Distribuição da produção de ovos no ano de 1995.

REGIÃO		ESTADO	
Sudeste	53,40 %	São Paulo	40,07 %
		Minas Gerais	9,01 %
Sul	21,58 %	Paraná	11,02 %
		Rio Grande do Sul	8,29 %
Nordeste	16,00 %	Pernambuco	5,94 %
		Ceará	4,73 %
Centro-oeste	6,69 %	Goiás	3,64 %
Norte	2,33 %		

Fonte: Tonzar et al. (1997).

O ovo líquido pasteurizado é utilizado como insumo em indústrias de maionese, massas e biscoitos, sorvetes, chocolates, confeitarias, padarias, hospitais, restaurantes industriais, nutrição para esportistas (albumina) e fast-food, apresentando um crescimento significativo nos últimos anos devido a algumas vantagens, como por exemplo:

- a) trata-se de um produto de qualidade controlada, diminuindo, assim, o risco de contaminação por microrganismos patogênicos;
- b) redução de custos, eliminando uma etapa do processo e mão-de-obra;
- c) redução de perdas, pois, além de ser comercializado com pesos definidos, evita-se o risco da compra de ovos trincados, quebrados e deteriorados;
- d) eliminação de resíduos (casca);
- e) uniformidade e padronização do produto;
- f) facilidade do transporte;

Na tabela 1.3 são mostrados os principais mercados para ovo líquido:

Tabela 1.3 Mercados consumidores de ovo líquido e respectivas porcentagens.

Produto	Porcentagem (%)
Maionese	60
Massas	23
Outros	17

Fonte: Ito Avicultura

Obs.: O item "Outros" compreende indústrias de sorvetes, chocolates e confeitarias.

Segundo informações obtidas junto às empresas, um fator que influencia o crescimento do consumo de ovos processados por diversos setores é a flexibilidade apresentada pelo produto, uma vez que ele pode ser comercializado sob diferentes formas: ovo integral, gema de ovo e/ou clara de ovo.

Alguns dos mais importantes produtos de ovo são os envolvidos com líquidos refrigerados, congelados, produtos secos. Esta classe de processos industriais deve trabalhar com ovo integral ou clara ou gema separadamente, envolvendo diferentes quantidades de cada parte (American Egg Board, 1999).

1.2. Reologia

No processamento de ovo líquido pasteurizado ou em pó, os parâmetros de escoamento de misturas de ovo líquido com diferentes concentrações, possui um importante papel em várias operações

unitárias, como bombeamento, escoamento em tubulações, aquecimento, resfriamento e secagem. Em geral, a modelagem, otimização e automação de processos alimentícios torna-se difícil devido à complexidade da matéria-prima e produtos envolvidos, os quais afetam os parâmetros reológicos do fluido. Além disso, os parâmetros reológicos de alguns alimentos exibem alterações substanciais com a temperatura, o conteúdo de umidade e o tempo de cisalhamento, durante o processamento, sendo o ovo um exemplo deste tipo de produto. Modelos matemáticos que expressam a dependência dos parâmetros reológicos com a temperatura e conteúdo de umidade são uma atraente alternativa para os experimentos, e uma importante ferramenta para a implementação de rotinas computacionais para a automação de processos e projeto de equipamentos.

Vários autores revisaram os métodos existentes para medir os parâmetros reológicos de alimentos, entre eles Telis-Romero et al. (1999), Velez-Ruiz & Barbosa-Cánovas (1998), Bhattacharya (1998), Guerrero & Alzamora (1997; 1998), Briggs & Steffe (1997), Mizrahi (1997), Giners et al. (1996). Esses autores encontraram diferentes comportamentos reológicos, como o Newtoniano, pseudoplástico e pseudoplástico com tensão inicial de escoamento, recomendando diferentes maneiras de determinar a taxa de deformação.

A taxa de deformação para fluidos Newtonianos e pseudoplásticos sem tensão inicial de escoamento pode ser determinada



pela solução clássica de Krieger & Elrod (1953). Já para fluidos que possuem tensão inicial pode ser utilizada a solução de Yang & Krieger (1979).

Na literatura não foram encontrados parâmetros de escoamento de misturas de ovo, bem como a sua dependência em relação à temperatura e à proporção clara/gema, embora encontrem-se os trabalhos de Pitsilis et al. (1984a) para gema salgada e ovo integral, Pitsilis et al. (1984b) para clara salgada, Ibarz (1993) para gema salgada e Ibarz & Sengalés (1995) para gema salgada.

O objetivo do presente trabalho foi medir os parâmetros reológicos (referentes a um comportamento pseudoplástico com dependência do tempo) de misturas de clara/gema em função da temperatura e da proporção de clara, utilizando um modelo reológico para fluidos com parâmetros independentes do tempo (considerando $\tau_{\text{máximo}}$ e $\tau_{\text{equilíbrio}}$).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processamento de Ovo Desidratado, Resfriado e Congelado

A Figura 2.1 ilustra o fluxograma básico para a produção de ovo desidratado, sendo que uma alternativa a este processo é a obtenção de ovo líquido resfriado ou congelado.

Ao chegar à indústria, os ovos são inspecionados e lavados seguindo então para a operação de separação de suas partes: casca, clara e gema. Esta operação é realizada por uma quebradeira e um separador de clara e gema, o qual pode processar até 3600 ovos por hora. O quebrador quebra o ovo ao meio e retira sua casca. O separador é composto por dois copos posicionados um sobre o outro: o copo superior retém a gema e permite que a clara passe para o inferior. Muitos desses equipamentos são fixados ao redor de uma mesa rotatória, podendo ser facilmente removidos para limpeza e remoção de resíduos. A rotação da mesa possibilita um tempo suficiente para separação da clara e da gema.

Na produção de ovo integral não é necessário o processo de separação, tornando a operação muito mais rápida e de menor custo. O ovo líquido integral ou separado em clara e gema é então filtrado para remoção de pedaços da casca, membranas e outras partículas sólidas. A partir daí o líquido é armazenado em tanques, onde aditivos como sal e

açúcar são adicionados para estabilizar a mistura e atingir características desejadas para o produto final.

A etapa de pasteurização é obrigatória no processamento de ovo e nesta etapa deve-se eliminar todos os microorganismos patogênicos.

Na maioria das indústrias o ovo líquido é pasteurizado utilizando-se trocadores de calor a placas. Temperatura, tempo e pH afetam a pasteurização do ovo líquido. A clara do ovo é mais sensível a altas temperaturas do que a gema, visto que as proteínas presentes na mesma podem sofrer coagulação. Desta maneira, adiciona-se ácido láctico para ajustar o pH por volta de 7,0, de modo a permitir que a clara resista a temperaturas de 61 a 62°C. A gema líquida, requer temperaturas mais elevadas para sua pasteurização (62°C por 3,5 minutos).

O ovo líquido é extremamente perecível e deve ser resfriado imediatamente após a pasteurização, devendo ser mantido em baixas temperaturas até o consumo. Sua vida de prateleira, quando mantido a temperatura de 1 a -1°C, é de aproximadamente duas à três semanas. Prolongar este prazo de consumo do ovo líquido resfriado é uma tarefa relativamente complicada, pois as proteínas encontradas no ovo, principalmente na clara, são sensíveis a altas temperaturas, o que impossibilita um tratamento térmico mais rigoroso.

Uma alternativa utilizada para o aumento da vida de prateleira do ovo líquido é o seu congelamento, onde a temperatura deve



ser reduzida a níveis inferiores a -12°C no prazo máximo de 60 horas após a pasteurização.

Na desidratação do ovo líquido o método mais utilizado é o spray-dryer. Neste método o líquido é pulverizado por bicos que operam em 3,5 – 4,0 MPa. As gotículas atomizadas entram na câmara de secagem, que trabalha com ar a temperaturas de 120 a 230°C , geralmente em contra corrente. Devido à grande superfície de contato das gotículas, a evaporação ocorre rapidamente.

A desidratação do ovo líquido também pode ser feita em freeze-dryer, para casos específicos como ovos mexidos e omelete, e em secadores de bandejas para produção de flocos de clara.

Figura 2.1 Fluxograma da Produção de Ovo Desidratado

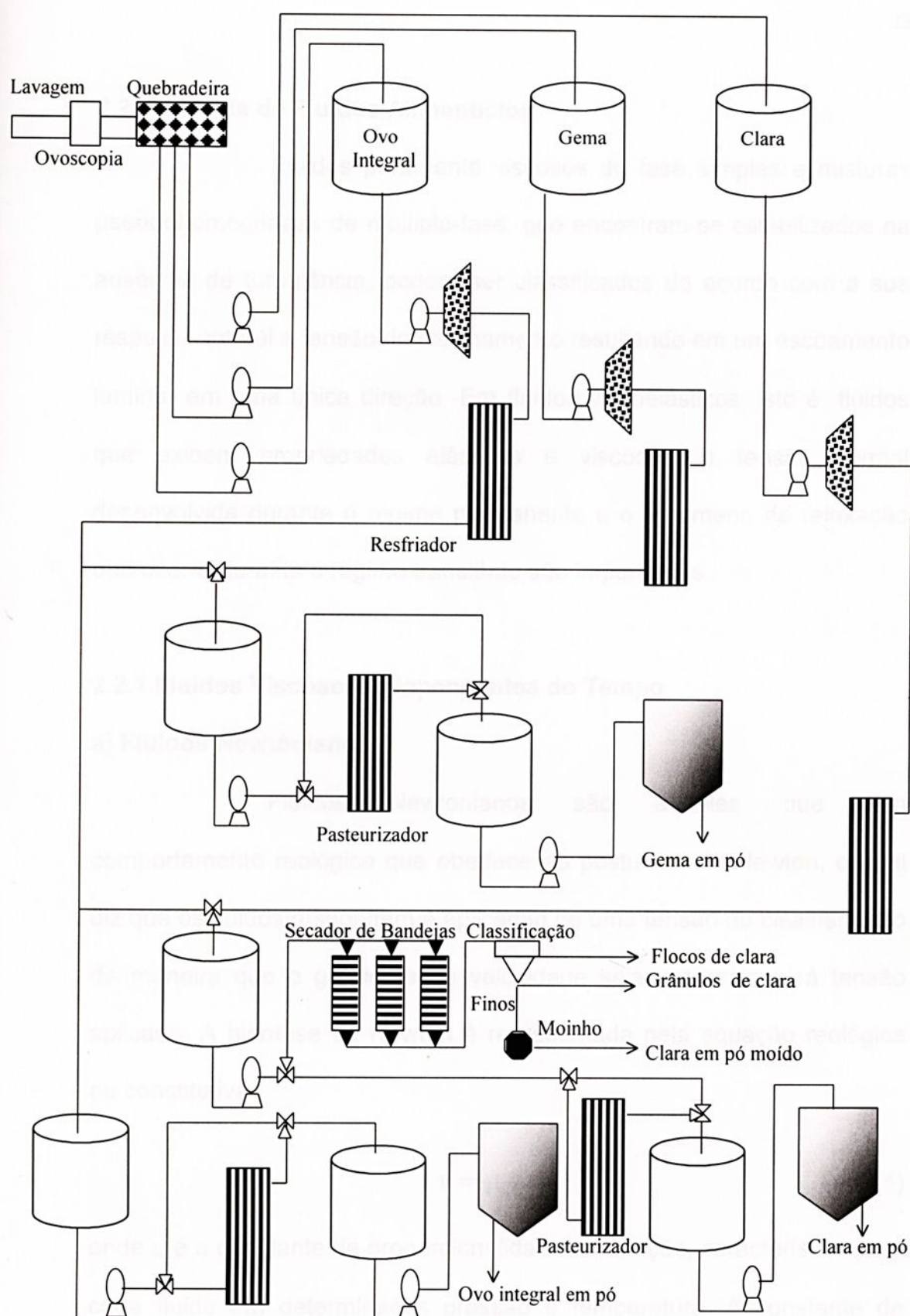


Figura 2.1 Fluxograma do Processo de Produção de Ovo Desidratado.

2.2. Reologia de Fluidos Alimentícios

Fluidos puramente viscosos de fase simples e misturas pseudohomogêneas de múltipla-fase, que encontram-se estabilizados na ausência de turbulência, podem ser classificados de acordo com a sua resposta natural à tensão de cisalhamento resultando em um escoamento laminar em uma única direção. Em fluidos viscoelásticos, isto é, fluidos que exibem propriedades elásticas e viscosas, a tensão normal desenvolvida durante o regime permanente e o fenômeno de relaxação que ocorre durante o regime transiente são importantes.

2.2.1 Fluidos Viscosos Independentes do Tempo

a) Fluidos Newtonianos

Fluidos Newtonianos são aqueles que têm comportamento reológico que obedece ao postulado de Newton, o qual diz que os fluidos respondem à aplicação de uma tensão de cisalhamento de maneira que o gradiente de velocidade seja proporcional à tensão aplicada. A hipótese de Newton é representada pela equação reológica ou constitutiva

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

onde μ é a constante de proporcionalidade na relação, característica para cada fluido em determinadas pressão e temperatura. A constante de proporcionalidade é conhecida como viscosidade do fluido e apenas esta



propriedade define o comportamento reológico dos fluidos que seguem a equação (2.1).

Na verdade, um grande número de fluidos comporta-se desta maneira, incluindo todos os gases e diversos líquidos, especialmente aqueles que têm moléculas relativamente simples, e suspensões pseudo-homogêneas de partículas esféricas em gases ou líquidos simples. Como exemplos podemos citar cerveja, vinho, Freon 22, álcool etílico, etc.

Os reogramas (curvas de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação) dos fluidos Newtonianos são retas que passam pela origem. As inclinações das retas são as viscosidades dos fluidos.

b) Fluidos Pseudoplásticos

Fluidos pseudoplásticos são aqueles cujo comportamento é independente do tempo, com uma tensão de cisalhamento infinitesimal iniciando o escoamento e para os quais a taxa de incremento na tensão de cisalhamento aumenta com a diminuição do gradiente de velocidade. Este tipo de comportamento é amplamente encontrado em suspensões vegetais de origem alimentícia (soluções com grandes moléculas ou partículas finas agregadas, ou desalinhas) que são estáveis e reprodutíveis em qualquer taxa de deformação, e as quais se reformam rapidamente com o aumento ou diminuição da taxa de deformação. Não



há apenas uma equação constitutiva simples que possa descrever o comportamento reológico de fluidos pseudoplásticos, entretanto algumas equações empíricas são úteis sobre faixas limitadas de gradientes de velocidade. A maioria é simples, porém introduzem duas constantes características para o fluido. Exemplos de fluidos pseudoplásticos são purês e sucos concentrados de frutas, leite condensado, extrato de café, iogurte, mostarda, etc.

Viscosidade Aparente

Apenas os fluidos Newtonianos possuem uma propriedade que pode ser chamada estritamente de viscosidade e todos os fluidos não-Newtonianos requerem dois ou mais parâmetros para descrever seu comportamento reológico. Porém, é conveniente nos referirmos à viscosidade aparente de um fluido não-Newtoniano. A viscosidade aparente, μ_a , é definida por:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.2)$$

e é dependente da taxa de deformação.

Para fluidos pseudoplásticos, μ_a decresce assintoticamente, desde μ_0 em $\dot{\gamma} = 0$, até um valor limite μ_∞ quando $\dot{\gamma} = \infty$.

Modelo de Ostwald-De Waele

Amplamente utilizado em cálculos de engenharia, este modelo é chamado corriqueiramente de lei da potência, sendo dado pela equação:

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

Nesta equação, K é o índice de consistência e n é o índice de comportamento do fluido. O valor de n é menor que a unidade para fluidos pseudoplásticos. Pode-se perceber que se $n = 1$, a equação (2.3) se reduz à lei de Newton da viscosidade. A equação que prediz a viscosidade aparente é dada pela equação

$$\mu_a = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.4)$$

O modelo da lei da potência para fluidos pseudoplásticos ajusta bem dados experimentais em taxas de deformação intermediárias, porém falha em taxas de deformação muito baixas ou muito altas. Quando a taxa de deformação para um fluido pseudoplástico se aproxima de zero, a tensão de cisalhamento se aproxima de zero e o comportamento se aproxima do modelo de Newton. O mesmo ocorre em taxas de deformação muito altas. Mesmo assim, até os dias atuais, este modelo é um dos mais utilizados em problemas que envolvem escoamento de fluidos.

Modelo de Prandtl-Eyring

Um segundo modelo de duas constantes (Govier & Azis, 1972) descrevendo o comportamento de fluidos pseudoplásticos é uma equação baseada na teoria cinética de líquidos de Eyring. Esta equação é:

$$\tau = A \sinh^{-1} \left(\frac{\dot{\gamma}}{B} \right) \quad (2.5)$$

onde A e B são os parâmetros reológicos do material. A viscosidade aparente de um fluido que obedece o modelo de Prandtl-Eyring é dada por:

$$\mu_a = \frac{A \sinh^{-1} \left(\frac{\dot{\gamma}}{B} \right)}{\dot{\gamma}} \quad (2.6)$$

Da mesma maneira que o modelo da lei da potência, esta equação cobre uma determinada faixa de taxas de deformação. Diferentemente do modelo de Ostwald-De Waele, este modelo se reduz assintoticamente à lei de Newton da viscosidade, com $A/B = \mu$, em baixas taxas de deformação.

Modelo de Powell-Eyring.

O chamado modelo de Powell-Eyring (Govier & Azis, 1972) é formado pelo modelo de Prandtl-Eyring com a adição do modelo de Newton:



$$\tau = \mu \dot{\gamma} + A \sinh^{-1} \left(\frac{\dot{\gamma}}{B} \right) \quad (2.7)$$

onde A, B e μ são os parâmetros reológicos do material. A viscosidade aparente de um fluido que obedece ao modelo de Powell-Eyring é dada por:

$$\mu_a = \mu + \frac{A \sinh^{-1} \left(\frac{\dot{\gamma}}{B} \right)}{\dot{\gamma}} \quad (2.8)$$

Modelo de Ellis

Uma equação empírica mais flexível é a de Ellis (Skelland, 1967), a qual contém três parâmetros:

$$\dot{\gamma} = (\varphi_0 + \varphi_1 \tau^{\alpha-1}) \tau \quad (2.9)$$

onde φ_0 , φ_1 , e α são os parâmetros reológicos do material. A viscosidade aparente de um fluido que obedece ao modelo de Ellis é dada por:

$$\mu_a = \frac{1}{\varphi_0 + \varphi_1 \tau^{\alpha-1}} \quad (2.10)$$

Esta equação, quando $\varphi_1 = 0$ reduz-se ao modelo de Newton com $\varphi_0 = \frac{1}{\mu}$; se $\varphi_0 = 0$, a equação reduz-se ao modelo de

Ostwald-De Waele com $\alpha = \frac{1}{n}$ e $\varphi_1 = \left(\frac{1}{K} \right)^{\frac{1}{n}}$. Quando $\alpha > 1$ a equação se

aproxima ao modelo de Newton em baixas tensões de cisalhamento,

sendo que com $\alpha < 1$ tende ao modelo de Newton em altas tensões de cisalhamento.

Modelo de Reiner-Philippoff

Outra equação empírica de três parâmetros é o modelo de Reiner-Philippoff (Govier & Azis, 1972).

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + \left(\frac{\tau}{\tau_s}\right)^2}} \quad (2.11)$$

onde μ_0 , μ_{∞} e τ_s são os parâmetros reológicos do material.

Esta equação se reduz ao modelo de Newton em taxas de deformação muito baixas com $\mu_0 = \mu$, e em muito altas com $\mu_{\infty} = \mu$. A viscosidade aparente de um fluido que obedece o modelo de Reiner-Philippoff é dada por:

$$\mu_a = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + \left(\frac{\tau}{\tau_s}\right)^2} \quad (2.12)$$

Modelo de Sisko

Uma equação mais simples de três parâmetros é o modelo proposto por Sisko em 1958 (Govier & Azis, 1972) baseado no conceito de aditividade de um modelo Newtoniano com um modelo de Ostwald-De Waele, como segue:

$$\tau = a \dot{\gamma} + b \dot{\gamma}^c \quad (2.13)$$

onde a , b , e c são os parâmetros reológicos. A viscosidade aparente pode ser expressa por:

$$\mu_a = a + b \dot{\gamma}^{c-1} \quad (2.14)$$

Modelo de Cross

Cross desenvolveu em 1965, a partir de considerações mecânicas, uma equação constitutiva de três parâmetros para fluidos pseudoplásticos, a qual parece muito simples quando comparada a outros (Govier & Azis, 1972). Sua equação é expressa como segue:

$$\tau = \mu_{\infty} \dot{\gamma} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{\left(1 + \alpha \dot{\gamma}^{2/3}\right)} \dot{\gamma} \quad (2.15)$$

onde μ_0, μ_{∞} são a viscosidade aparente na taxa de deformação em zero e infinito, respectivamente, e α é um coeficiente relacionado com a estabilidade da estrutura.

A equação também pode ser expressa por:

$$\mu_a = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + \alpha \dot{\gamma}^{2/3}} \quad (2.16)$$

A equação de Cross tem sido testada para vários fluidos pseudoplásticos, incluindo soluções de carboximetil-celulose. O expoente $2/3$ na taxa de deformação tem uma justificativa teórica.

Modelo de Meter

Um modelo versátil de quatro parâmetros é o modelo proposto por Meter em 1963 e utilizado por Meter e Bird em 1964 (Govier & Azis, 1972) num estudo de escoamentos laminares de fluidos pseudoplásticos. O modelo de Meter é dado por:

$$\tau = \mu_{\infty} \dot{\gamma} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{\left(1 + \left(\frac{\tau}{\tau_m}\right)^{\alpha-1}\right)} \dot{\gamma} \quad (2.17)$$

onde μ_0, μ_{∞} são a viscosidade aparente na taxa de deformação em zero e infinito respectivamente, e τ_m a tensão de cisalhamento onde

$$\mu_a = \frac{1}{2}(\mu_0 + \mu_{\infty}).$$

Quando $\mu_{\infty} \ll \mu_0$, como acontece freqüentemente, τ_m é a

tensão de cisalhamento quando $\mu_a \cong \frac{1}{2} \mu_0$ e é definido por $\tau_{1/2}$.

A equação também pode ser expressa por:

$$\mu_a = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + \left(\frac{\tau}{\tau_m}\right)^{\alpha-1}} \quad (2.18)$$

c) Fluidos Dilatantes

Fluidos dilatantes são aqueles que apresentam comportamento independente do tempo, nos quais uma tensão de cisalhamento infinitesimal inicia o escoamento e onde a taxa de incremento da tensão de cisalhamento aumenta com o crescimento do

gradiente de velocidades. Matematicamente são similares aos pseudoplásticos e, de fato, a equação empírica para pseudoplásticos é aplicada para dilatantes com diferentes valores das constantes reológicas. Com referência à lei da potência, o índice de comportamento, n , é > 1 para fluidos dilatantes e < 1 para pseudoplásticos.

Fluidos dilatantes são menos comuns que pseudoplásticos e este comportamento é observado em certas faixas de concentração em suspensões irregulares de sólidos em líquidos. Exemplos deste tipo de fluidos são soro de purê de tomate, soluções aquosas de amido de mandioca e milho.

d) Fluidos de Bingham

O fluido de Bingham é aquele que necessita de uma tensão de cisalhamento inicial finita para iniciar o escoamento e para o qual há uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade resultante, exceto na tensão inicial.

Materiais que têm este comportamento ou que se aproximam de um plástico de Bingham incluem graxas pastosas de hidrocarbonetos, certos asfaltos, algumas emulsões, e suspensões pseudohomogêneas de finas partículas em líquidos em concentrações intermediárias (desta maneira suspensões podem ser Newtonianas ou pseudoplásticas em baixas concentrações e dilatantes em altas concentrações). Algumas suspensões de água e argila, cinza vulcânica,



minerais finamente divididos, quartzo, óxidos metálicos, esgoto e tintas, apresentam comportamento de plásticos de Bingham, dentro de uma determinada faixa de concentração e especialmente em baixas taxas de deformação. Soluções aquosas de certos polímeros de cadeia longa (carboximetilcelulose) exibem tensão inicial de escoamento acima de determinadas concentrações e podem ser consideradas Binghamianas, mas geralmente elas são mais bem representadas pelo modelo de pseudoplástico com tensão inicial de escoamento.

A equação constitutiva para um fluido de Bingham é:

$$\tau = \tau_0 + \eta_B \dot{\gamma} \quad (2.19)$$

onde τ_0 = tensão inicial de escoamento e η_B = viscosidade plástica.

e) Pseudoplásticos com Tensão Inicial de Escoamento

Alguns materiais exibem uma tensão inicial de escoamento, como no caso dos plásticos de Bingham, mas a relação entre a tensão de cisalhamento, exceto a que inicia o escoamento, e o gradiente de velocidades resultante não é linear. O fluido mais comum, que apresenta este comportamento, é o pseudoplástico com tensão inicial de escoamento - no caso menos comum, o fluido apresenta comportamento de um dilatante com tensão inicial de escoamento. Exemplos destes fluidos são purês e sucos concentrados de frutas, extrato de café em temperaturas de congelamento, etc.



Como no caso de pseudoplásticos, não há uma equação teórica para pseudoplásticos com tensão inicial de escoamento, mas algumas equações empíricas para pseudoplásticos podem ser modificadas para este fluido. A equação da lei da potência, neste caso, é dada por:

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (2.20)$$

onde τ_0 , K e n são coeficientes característicos. Esta equação com três parâmetros, proposta por Herschel e Bulkley (1926), descreve o comportamento dos pseudoplásticos com tensão inicial de escoamento razoavelmente bem, exceto para altas taxas de deformação.

2.2.2. Fluidos Viscosos Dependentes do Tempo

Os fluidos dependentes do tempo são classificados como tixotrópicos ou reopéticos, dependendo do comportamento da tensão de cisalhamento em relação ao tempo, para uma taxa de deformação fixa.

a) Fluidos Tixotrópicos

Os fluidos tixotrópicos apresentam um decréscimo reversível na tensão de cisalhamento com o tempo, em uma taxa de deformação fixa. Ou seja, o processo de rompimento das estruturas dos fluidos tixotrópicos depende do tempo de cisalhamento e da taxa de deformação.



Na verdade, um fluido tixotrópico pode ser um pseudoplástico com ou sem tensão inicial de escoamento que muda suas propriedades com o tempo de aplicação de tensão de cisalhamento, até atingir o equilíbrio ou valor limite.

O comportamento de fluidos tixotrópicos é freqüentemente estudado através da histerese de curvas obtidas quando um fluido é submetido a tensões de cisalhamento sucessivamente crescentes até um valor máximo e, imediatamente após atingir esse máximo, sucessivamente decrescentes. Apesar destes estudos serem úteis para identificar a presença de tixotropia, eles fornecem dados de pouca utilidade no estudo da hidrodinâmica e transferência de calor de escoamentos de fluidos tixotrópicos em qualquer geometria de duto, a partir dos quais busca-se obter parâmetros de projeto como fatores de atrito, coeficientes de transferência de calor convectivo e coeficientes de perda de carga em acessórios.

Muitos estudos foram realizados no intuito de se conseguir formular relações quantitativas entre o comportamento reológico e o tempo de escoamento. Moore (1959) propôs duas relações, relativamente simples, para descrever o comportamento tixotrópico de um fluido que não possui tensão inicial de escoamento (Govier & Azis, 1972). Estas relações são:

$$\tau = \dot{\gamma}(\mu_0 + c\lambda) \quad (2.21)$$



$$\frac{d\lambda}{d\theta} = a - \left(a + b\dot{\gamma} \right) \lambda \quad (2.22)$$

onde, μ_0 , a , b , c são constantes reológicas do fluido, e λ é um parâmetro estrutural, tendo valores entre 0 e 1 nos limites onde a estrutura é totalmente rompida.

b) Fluidos Reopéticos

Os fluidos reopéticos são também conhecidos como fluidos de tixotropia negativa ou anti-tixotrópicos. Este comportamento é menos comum que o tixotrópico, e é caracterizado por apresentar um acréscimo reversível na tensão de cisalhamento com o tempo, em uma taxa de deformação fixa. Os fluidos reopéticos também apresentam curva de histerese, obtidas através do mesmo procedimento descrito para os tixotrópicos. Em uma dada taxa de deformação a tensão de cisalhamento tende a um valor de equilíbrio ou um valor máximo. O tempo requerido para que o sistema atinja o equilíbrio depende de características particulares do fluido.

2.2.3 Fluidos Viscoelásticos

Os fluidos viscoelásticos são aqueles que apresentam propriedades viscosas e elásticas ao mesmo tempo, sendo que as propriedades viscosas podem ser não Newtonianas e dependentes do tempo.

As propriedades elásticas dos fluidos viscoelásticos se manifestam através da presença de tensões perpendiculares à direção de cisalhamento, tensões essas que são de magnitude diferente das tensões normais paralelas à direção de cisalhamento.

Essas propriedades elásticas se manifestam sempre que um material viscoelástico é submetido a uma rápida variação na deformação, como por exemplo, quando o escoamento é abruptamente interrompido, verifica-se uma lenta queda na tensão de cisalhamento, ao invés do desaparecimento imediato desta tensão, o que ocorre para fluidos puramente viscosos.

2.3. Escoamento Laminar de Fluidos Não Newtonianos em Dutos Circulares

A partir das equações de conservação da massa e quantidade de movimento, pode-se descrever todos os problemas de escoamento, independente do comportamento do fluido ser Newtoniano ou não, desde que seja possível modelar este comportamento.

As equações de conservação gerais escritas em termos de derivadas substanciais são:

a) *continuidade*

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho(\nabla \cdot \vec{v}) \quad (2.23)$$

b) *quantidade de movimento:*

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla p - \nabla \vec{\tau} + \rho \cdot \vec{g} \quad (2.24)$$

Para o estudo do escoamento em regime permanente plenamente estabelecido em um tubo de raio constante R , independente do seu caráter Newtoniano ou não, pode-se utilizar a equação da quantidade de movimento entre as seções 1 e 2, conforme a Figura 2.2.

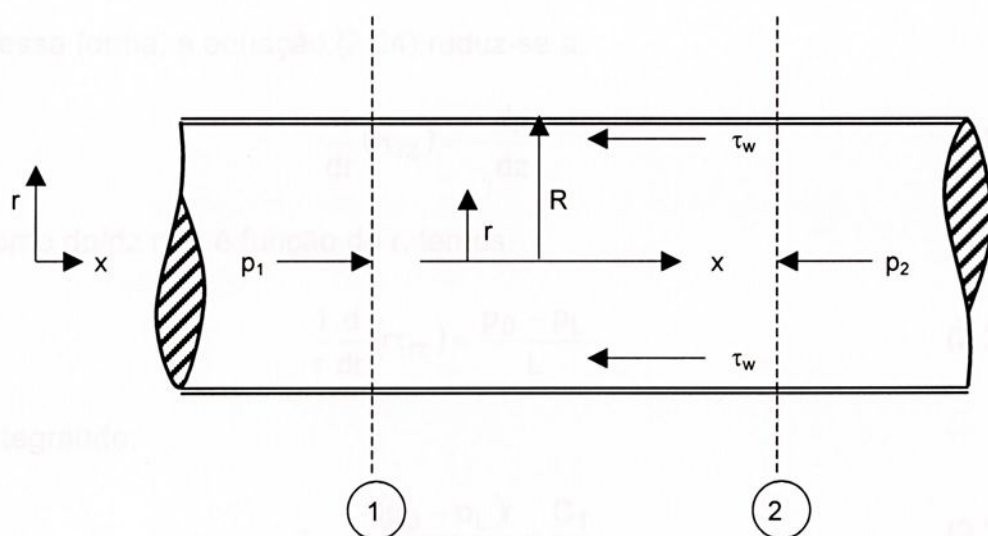


Figura 2.2 Tensões atuando no elemento de um fluido qualquer

Para um fluido não-Newtoniano representado pela equação da lei da potência (equação 2.3), pode-se resolver o problema a partir da equação de conservação de quantidade de movimento (equação 2.24), fazendo as seguintes considerações:

- o escoamento é estacionário (regime permanente);
- o escoamento é isotérmico;
- o escoamento é plenamente desenvolvido;
- o escoamento é retilíneo e simétrico em relação ao eixo z ;

- o escoamento é incompressível ($\rho = \text{cte}$);
- não há deslizamento na parede;
- o fluido comporta-se como um meio contínuo;
- o fluido tem comportamento do tipo pseudoplástico representado pelo modelo de Ostwald-De Waele.

Dessa forma, a equação (2.24) reduz-se a:

$$\frac{d}{dr}(r\tau_{rz}) = -\frac{dp}{dz}r \quad (2.25)$$

como dp/dz não é função de r , temos:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr}(r\tau_{rz}) = \frac{p_0 - p_L}{L} \quad (2.26)$$

Integrando:

$$\tau_{rz} = \frac{(p_0 - p_L)r}{2L} + \frac{C_1}{r} \quad (2.27)$$

e considerando que em $r = 0$, $\tau_{rz} = 0$, chega-se a:

$$\tau_{rz} = \tau_p \frac{r}{R} \quad (2.28)$$

onde τ_p é a tensão de cisalhamento na parede.

Substituindo a equação (2.3) na equação (2.28) obtêm-se:

$$-K\left(\frac{dv_z}{dr}\right)^n = \tau_p \frac{r}{R} \quad (2.29)$$

que após rearranjada e integrada fornece:

$$v_z = -\left(\frac{\tau_p}{KR}\right)^{\frac{1}{n}} \left[\frac{r^{\left(\frac{1}{n}+1\right)}}{\left(\frac{1}{n}+1\right)} \right] + C_2 \quad (2.30)$$

Utilizando a segunda condição de contorno, para $r = R$, $v_z = 0$, obtemos o perfil de velocidades:

$$v_z = \left(\frac{\tau_p}{KR}\right)^{\frac{1}{n}} \left[\frac{R}{\left(\frac{1}{n}+1\right)} \right] \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{\left(\frac{1}{n}+1\right)} \right] \quad (2.31)$$

Uma vez conhecido o perfil de velocidades, pode-se calcular:

a) a velocidade máxima, que acontece em $r = 0$:

$$v_{z\max} = \left(\frac{\tau_p}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \left[\frac{R}{\left(\frac{1}{n}+1\right)} \right] \quad (2.32)$$

b) a vazão volumétrica, que é o produto da área pela velocidade média:

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^R v_z r dr d\phi = \frac{\pi R^3}{\left(\frac{1}{n}+3\right)} \left[\frac{(P_0 - P_L) R}{2KL} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2.33)$$

c) a velocidade média v_{zm} , que é obtida pela vazão dividida pela área da mesma:

$$v_{zm} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R v_z r dr d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^R r dr d\phi} = \left(\frac{\tau_p}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \left[\frac{R}{\left(\frac{1}{n}+3\right)} \right] \quad (2.34)$$

Para $n = 1$ tem-se que $K = \mu$ e a equação (2.33) se reduz à equação de Hagen-Poiseuille.

O fator de atrito de Fanning para escoamento laminar plenamente desenvolvido é determinado por:

$$f = \frac{16}{Re_G} \quad (2.35)$$

onde

$$Re_G = \frac{\rho \cdot v^{2-n} D^n}{K' \cdot 8^{n-1}} \quad (2.36)$$

$$K' = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \quad (2.37)$$



3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

Os ovos utilizados neste trabalho foram adquiridos de uma mesma granja, instalada na cidade de Marília - SP. Estes ovos foram utilizados em um período máximo de 24 horas após a postura. Procurou-se, com isso, garantir uma matéria-prima com características constantes ao longo do trabalho.

A gema foi separada manualmente da clara. As misturas foram feitas em proporção volumétrica.

Como parâmetro de controle da matéria-prima foi adotado o teor de sólidos totais da gema e da clara, os quais variam em função do tempo de postura. As amostras ensaiadas apresentaram teor de sólidos totais em torno de $(45,19 \pm 0,13)\%$ para a gema e $(11,98 \pm 0,10)\%$ para a clara.

3.2. Determinação do Teor de Sólidos Totais

O teor de sólidos totais foi determinado indiretamente, por subtração do conteúdo de umidade.

O conteúdo de umidade foi medido em estufa, a 105-110°C por 12 horas (Stadelman & Cotterill, 1986). Antes da secagem, as amostras foram misturadas com areia (tratada e seca) para evitar a formação de crostas impermeáveis ao vapor de água.



3.3. Reologia

3.3.1. Obtenção dos Parâmetros Reológicos

Os parâmetros reológicos da mistura de clara e gema foram determinados utilizando-se um reômetro rotacional de cilindros concêntricos, tipo Searle, marca Rheotest 2.1. Este equipamento possui um dispositivo que permite a variação da velocidade de rotação do cilindro interno de 0.028 a 243 rpm.

O reômetro é equipado com uma camisa termostática que envolve o cilindro externo e em cujo interior circula uma solução de etanol/água para resfriamento ou aquecimento do fluido. A temperatura da amostra foi mantida constante durante cada experimento com o auxílio de um banho termostático. O equipamento possui vários sistemas de medidas que diferem entre si no raio do cilindro interno (R_b). A Figura 3.1 ilustra o sistema de cilindros concêntricos deste equipamento. Os sistema utilizado foi o denominado S1, que serve para medir parâmetros reológicos de fluidos com viscosidade aparente média. Estes cilindros são de aço inoxidável e a relação entre o raio do copo (R_c) e o raio do cilindro interno (R_b) é 1,02 para o sistema S1. A quantidade de amostra para o ensaio varia de acordo com o cilindro interno a ser utilizado, sendo de 25 ml para o sistema S1.

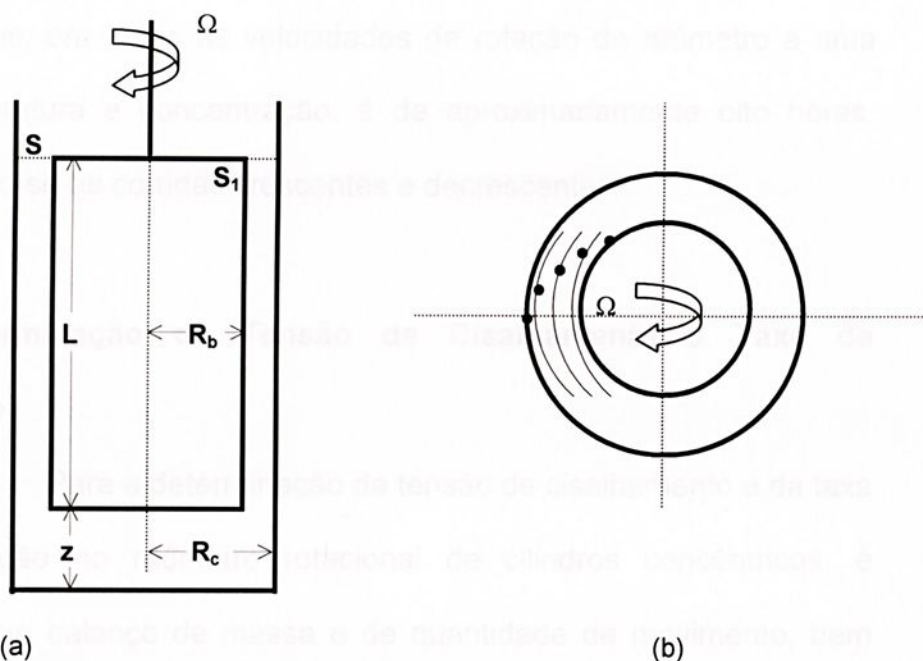


Figura 3.1 Reômetro rotacional de cilindros concêntricos: a) Vista lateral; b) Vista superior.

3.3.2. Operação do Reômetro

Após o cilindro de medição ter sido acoplado ao reômetro, a amostra foi introduzida vagarosamente no copo do cilindro externo e este também conectado ao equipamento. O sistema ficou em repouso por aproximadamente 30 minutos para o equilíbrio da temperatura da amostra. Iniciaram-se então as medidas reológicas, variando-se a velocidade de rotação de forma crescente e, em seguida, decrescente. Os valores das leituras para as velocidades crescentes foram diferentes dos valores observados para velocidades decrescentes, verificando-se assim a dependência do tempo. Esse comportamento foi verificado para todas as temperaturas e proporções estudadas.

Em geral, o tempo médio para a realização das medidas experimentais, em todas as velocidades de rotação do reômetro a uma dada temperatura e concentração, é de aproximadamente oito horas, considerando-se as corridas crescentes e decrescentes.

3.3.3. Determinação da Tensão de Cisalhamento e Taxa de Deformação

Para a determinação da tensão de cisalhamento e da taxa de deformação no reômetro rotacional de cilindros concêntricos, é necessário um balanço de massa e de quantidade de movimento, bem como a utilização de relação entre a velocidade angular e linear a partir dos dados experimentais. O balanço foi realizado num elemento diferencial de volume $r\Delta\phi\Delta r\Delta z$, como mostrado na Figura 3.2.

- Equação diferencial parcial resultante do balanço de massa num elemento diferencial de volume $r\Delta\phi\Delta r\Delta z$:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} (\rho v_\phi) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \quad (3.1)$$

onde:

ρ = densidade do fluido;

t = tempo;

r = raio;

v_r , v_ϕ e v_z = velocidades do fluido nas direções radial, angular e longitudinal, respectivamente.

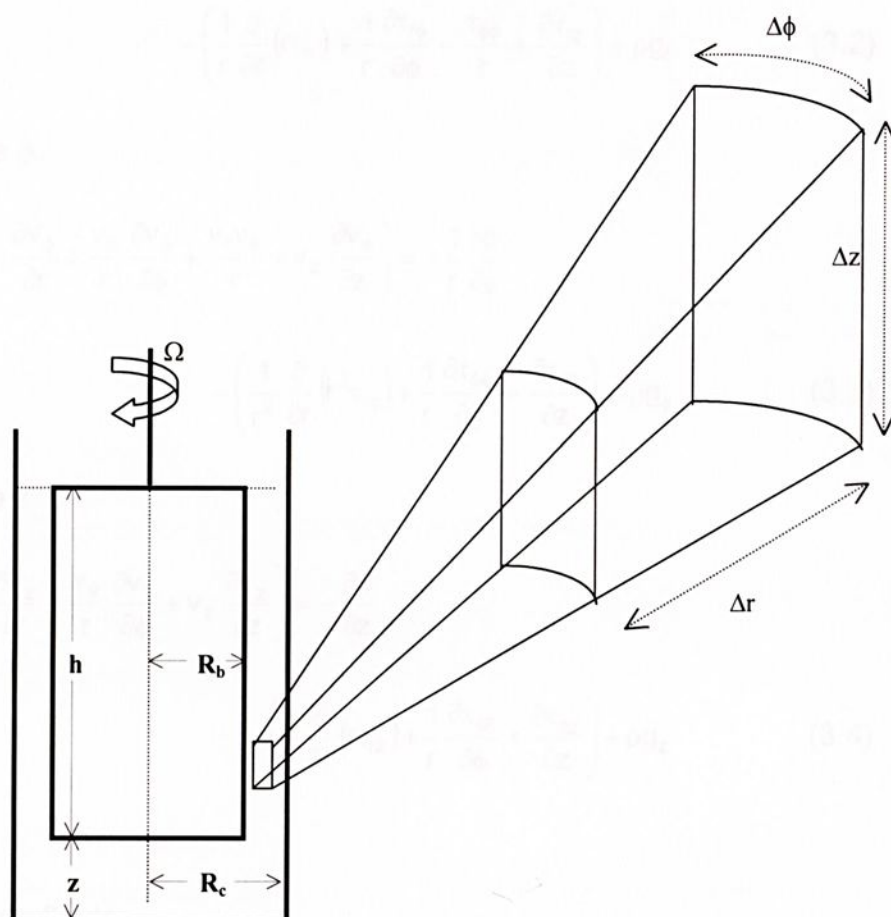


Figura 3.2 Elemento diferencial de volume $r\Delta\phi\Delta r\Delta z$ para os balanços de massa e quantidade de movimento no reômetro rotacional

- Equações diferenciais parciais resultantes do balanço de quantidade de movimento num elemento diferencial de volume $r\Delta\phi\Delta r\Delta z$:

Componente r

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} - \frac{v_\phi^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rr}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\phi}}{\partial \phi} - \frac{\tau_{\phi\phi}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right) + \rho g_r \quad (3.2)$$

Componente ϕ

$$\rho \left(\frac{\partial v_\phi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + \frac{v_r v_\phi}{r} + v_z \frac{\partial v_\phi}{\partial z} \right) = - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \phi} - \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\phi}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\phi\phi}}{\partial \phi} + \frac{\partial \tau_{\phi z}}{\partial z} \right) + \rho g_\phi \quad (3.3)$$

Componente z

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \phi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\phi z}}{\partial \phi} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (3.4)$$

onde:

p = pressão do fluido;

τ = tensão de cisalhamento;

g = aceleração gravitacional;

- Hipóteses para a resolução das equações (3.1), (3.2), (3.3) e (3.4):

- 1) Fluido incompressível (ρ = constante);
- 2) Regime de escoamento laminar;

- 3) Linhas de corrente do escoamento circulares no plano horizontal perpendicular ao eixo de rotação (i.e a velocidade é função somente do raio; supõe-se que não existe escoamento radial e axial);
- 4) O regime é estacionário $\left(\frac{\partial(\bar{v})}{\partial t}\right) = 0$;
- 5) Não há escorregamento na parede ($v_{\text{fluido}} = 0$ em $r = R_b$);
- 6) O movimento não é bidimensional (significa que podem ser desprezados os efeitos de borda do cilindro interno e as forças normais, como o efeito Weissenberg);
- 7) O sistema é isotérmico
- 8) Os parâmetros reológicos são independentes do tempo

A partir das hipóteses citadas, a equação (3.1) torna-se:

$$\left(\frac{\rho}{r}\right)\left(\frac{dv_{\phi}}{dr}\right) = 0 \quad (3.5)$$

Portanto, a componente de velocidade, v_{ϕ} deve ser uma constante.

Os três componentes da equação de quantidade de movimento com as restrições tornam-se:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d(r^2 \tau_{r\phi})}{dr} = 0 \quad (3.6)$$

A equação (3.6) pode ser integrada obtendo-se a forma:

$$r^2 \tau = c_1 \quad (3.7)$$

Os sub-índices da tensão de cisalhamento na equação (3.7) foram omitidos, já que só resta uma componente da tensão. A

constante de integração é avaliada a partir das condições de contorno. O torque externo é geralmente medido e a tensão de cisalhamento é obtida do torque que se opõe ao fluido, de acordo com:

torque = área x raio x tensão de cisalhamento

$$T = 2\pi r h r \tau \quad (3.8)$$

Onde c_1 da equação (3.7) é $T/2\pi h$.

Para condições estacionárias de escoamento, o momento observado é constante. O momento no fluido em qualquer dos dois raios do anulo pode ser equacionado. Quando isto é realizado para os dois contornos, obtém-se uma relação simples entre a tensão de cisalhamento e a posição do anulo.

$$T = \tau_b 2\pi R_b^2 h = \tau_c 2\pi R_c^2 h \quad (3.9)$$

$$\frac{\tau_b}{\tau_c} = \frac{R_c^2}{R_b^2} = \varepsilon^2 \quad (3.10)$$

onde:

$$\varepsilon = \frac{R_c}{R_b} \quad (3.11)$$

Logo a relação das tensões varia com o inverso do quadrado do raio.

Para determinar a taxa de deformação, consideramos uma velocidade linear em r em termos da velocidade angular (ω) em r :

$$v = r \cdot \omega \quad (3.12)$$

A derivada da velocidade com relação ao raio é:

$$\frac{dv}{dr} = \omega + r \frac{d\omega}{dr} \quad (3.13)$$

O primeiro termo, ω , seria a velocidade angular de todo o aparelho se este não estivesse sendo submetido ao cisalhamento, assim, a tensão interna é derivada do segundo termo a seguir:

$$\frac{dv}{dr} = r \frac{d\omega}{dr} \quad (3.14)$$

Antes de se efetuar a derivação das relações entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação, é de grande utilidade considerar algumas restrições quando essas duas variáveis estiverem sendo medidas. Geralmente, mede-se a tensão de cisalhamento na parede do cilindro interno ao invés de se medir num ponto intermediário do ânulo. Entretanto, a taxa de deformação deve ser calculada no mesmo ponto onde foi determinada a tensão de cisalhamento. Novamente, a equação (3.14) pode ser escrita como:

$$\dot{\gamma} = f(\tau) = r \frac{d\omega}{dr} = \frac{d\omega}{d \ln r} \quad (3.15)$$

Desde que T seja constante com as condições de regime permanente, a equação (3.8) fica:

$$\tau = \frac{T}{2\pi h} r^{-2} \quad (3.16)$$

Aplicando-se $\ln$ na equação (3.16) temos:

$$\ln \tau = \ln \frac{T}{2\pi h} + \ln r^{-2} \quad (3.17)$$

$$\ln \tau = \ln \frac{T}{2\pi h} - 2 \ln r \quad (3.18)$$

Derivando, tem-se:

$$d \ln \tau = -2 d \ln r \quad (3.19)$$

e de (3.15) e (3.19) obtém-se:

$$f(\tau) = -2(d\omega / d \ln \tau) \quad (3.20)$$

na superfície do cilindro interno, $\tau = \tau_b$ e $\omega = \Omega_b$, enquanto no copo, $\tau = \tau_c$ e $\omega = 0$. Integrando a equação (3.20) entre estes limites, obtém-se:

$$\Omega = -\frac{1}{2} \int_{\tau_b}^{\tau_c} f(\tau) d \ln \tau \quad (3.21)$$

A equação (3.21) pode ser rearranjada da seguinte forma:

$$\Omega(\tau_b) = -\frac{1}{2} \int_{\tau_b}^{\tau_c} \frac{f(\tau)}{\tau} d\tau \quad (3.22)$$

Da equação (3.10) tem-se que:

$$\tau_c = \frac{\tau_b}{\varepsilon^2} \quad (3.23)$$

$$\Omega(\tau_b) = -\frac{1}{2} \int_{\tau_b/\varepsilon^2}^{\tau_b} \frac{f(\tau)}{\tau} d\tau = -\frac{1}{2} \left[\int_{\tau_b}^{\tau_b/\varepsilon^2} \frac{f(\tau)}{\tau} d\tau + \int_{\tau_b/\varepsilon^2}^{\tau_b} \frac{f(\tau)}{\tau} d\tau \right] \quad (3.24)$$

$$\Omega' = \frac{1}{2} \frac{f(\tau_b)}{\tau_b} - \frac{1}{2} \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{f(\tau_c)}{\tau_c} \quad (3.25)$$

$$\Omega' = \frac{1}{2} \frac{f(\tau_b)}{\tau_b} - \frac{1}{2} \frac{f(\tau_c)}{\varepsilon^2 \tau_c} = \frac{1}{2\tau_b} [f(\tau_b) - f(\tau_c)] \quad (3.26)$$

e da diferenciação com relação a τ_b , obtém-se a relação:

$$\frac{d\Omega}{d\tau_b} = \frac{1}{2\tau_b} [f(\tau_b) - f(\tau_c)] \quad (3.27)$$

O método descrito para a obtenção de $f(\tau)$ baseou-se na solução da equação diferencial (3.27).

- Solução da Equação Diferencial (3.27)

A função $h(\tau_b)$ é dada pela relação:

$$h(\tau_b) = 2 \frac{d\Omega}{d \ln \tau_b} = 2\tau_b \frac{d\Omega}{d\tau_b} \quad (3.28)$$

Da equação (3.28):

$$h(\tau_b) = f(\tau_b) - f(\varepsilon^{-2}\tau_b) \quad (3.29)$$

e também:

$$h(\varepsilon^{-2}\tau_b) = f(\varepsilon^{-2}\tau_b) - f(\varepsilon^{-4}\tau_b) \quad (3.30)$$

$$h(\varepsilon^{-4}\tau_b) = f(\varepsilon^{-4}\tau_b) - f(\varepsilon^{-6}\tau_b) \quad (3.31)$$

Desde que $\varepsilon > 1$ e $f(0) = 0$,

$$\sum_{n=0}^{\infty} h(\varepsilon^{-2n}\tau_b) = f(\tau_b) \quad (3.32)$$

A somatória converge lentamente, podendo ser calculada assintoticamente, utilizando-se a série de Euler-Maclaurin:

$$\sum_{n=0}^m h(n) = \int_0^m h(x)dx + \frac{1}{2}[h(0) + h(m)] + \sum_{k=1}^r \frac{B_{2k}}{(2k)!} [h^{(2k-1)}(0) - h^{(2k-1)}(m)] + \sum_{i=0}^{m-1} \int_0^1 P_{2r+1}(x-i) h^{(2k-1)}(x)dx. \quad (3.33)$$

onde B_j é o número de Bernoulli e P_j é o polinômio de Bernoulli. Aplicando esta fórmula à somatória na equação (3.32):

$$\sum_{n=0}^{\infty} h(\varepsilon^{-2n}\tau_b) = \int_0^{\infty} h(\varepsilon^{-2n}\tau_b)dn + \frac{1}{2}[h(\tau_b) + h(0)]$$

$$+ \frac{1}{12} \left[\frac{dh(\varepsilon^{-2n}\tau_b)}{dn} \right]_{n=0}^{\infty} - \frac{1}{720} \left[\frac{d^3h(\varepsilon^{-2n}\tau_b)}{dn^3} \right]_{n=0}^{\infty} + \dots \quad (3.34)$$

A integral é calculada usando as substituições,

$$y = \varepsilon^{-2n}\tau_b \quad (3.35)$$

e

$$dn = -\frac{dy}{2y \ln \varepsilon} \quad (3.36)$$

Entretanto, em termos da definição de h ,

$$\int_0^{\infty} h(\varepsilon^{-2n}\tau_b) dn = \frac{-1}{2 \ln \varepsilon} \int_{\tau_b}^0 h(y) d \ln y = \frac{\Omega}{\ln \varepsilon} \quad (3.37)$$

As derivadas que aparecem em (3.34) são:

$$\frac{dh(\varepsilon^{-2n}\tau_b)}{dn} = -4 \ln \varepsilon \frac{d^2 \Omega}{d(\ln(\varepsilon^{-2n}\tau_b))^2} \quad (3.38)$$

$$\frac{d^3h(\varepsilon^{-2n}\tau_b)}{dn^3} = -16(\ln \varepsilon)^3 \frac{d^4 \Omega}{d(\ln(\varepsilon^{-2n}\tau_b))^4} \quad (3.39)$$

Desde que $h(\tau_b)$ e suas derivadas sejam zero quando

$\tau_b = 0$, a expressão assintótica final para a taxa de deformação pode ser

escrita:

$$f(\tau) = \dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\ln \varepsilon} \left(1 + \ln \varepsilon \frac{d \ln \Omega}{d \ln \tau_b} + \left[\frac{(\ln \varepsilon)^2}{3 \Omega} \frac{d^2 \Omega}{d(\ln \tau_b)^2} \right] - \left[\frac{(\ln \varepsilon)^4}{45 \Omega} \frac{d^4 \Omega}{d(\ln \tau_b)^4} \right] + \dots \right) \quad (3.40)$$

A determinação da taxa de deformação por meio da equação (3.40) pode ser utilizada para fluidos Newtonianos e não-Newtonianos sem tensão inicial de escoamento e parâmetros reológicos independentes do tempo (suposição fundamental em nosso trabalho).

3.3.4. Cálculo dos Parâmetros do Modelo de Ostwald-De Waele

Neste trabalho, devido ao fato das leituras no equipamento terem sido realizadas em ordem crescente e decrescente das velocidades angulares, os parâmetros reológicos foram determinados com os valores de tensão de cisalhamento máximos, na ordem crescente, e com os valores de tensão de cisalhamento de equilíbrio, na ordem decrescente.

O modelo de Ostwald-De Waele é não linear e, para a determinação dos parâmetros, utilizou-se o software *Microcal Origin*, onde foram fornecidos os valores de tensão de cisalhamento, taxa de deformação e a função do modelo. O melhor ajuste dos dados ao modelo ocorreu quando os coeficientes de correlação estiveram próximos da unidade.

3.4. Medidas de Queda de Pressão

A Figura 3.3 mostra um diagrama do equipamento utilizado para as medidas de queda de pressão durante o escoamento de clara, gema e misturas de clara-gema de ovo. O equipamento consiste em



uma seção de troca de calor, onde a amostra foi resfriada por um banho termostático, mantido a temperatura constante marca Marconi, modelo MA-184, provido de uma mistura etanol/água (40/60). A seção do trocador de calor consiste de dois tubos circulares e horizontais de aço carbono com diâmetro nominal de 1 ½ in (DI = 40,8 mm) e ¾ in (DI = 20,9 mm). O comprimento total desta seção é de 3,1 m, tendo uma razão entre o comprimento e o diâmetro (L/D) de no máximo 196. Transmissores de pressão Smar, modelo LD-301 foram utilizados para medir a pressão estática em cinco diferentes posições ao longo do equipamento, a 20, 30, 40, 60 e 90 cm da entrada da seção do trocador de calor. A amostra foi bombeada por uma bomba de deslocamento positivo (KSB, modelo P-500). A parede da tubulação foi mantida a temperatura constante pelo banho mencionado anteriormente. Um homogeneizador estático foi acoplado ao final do equipamento para garantir uma temperatura homogênea do fluido estudado. Um medidor de vazão (MLW, modelo LD100) foi utilizado para um ajuste inicial da vazão pretendida em cada experimento, mas medidas exatas foram conseguidas pela determinação da massa de algumas amostras coletadas durante determinados intervalos de tempo.

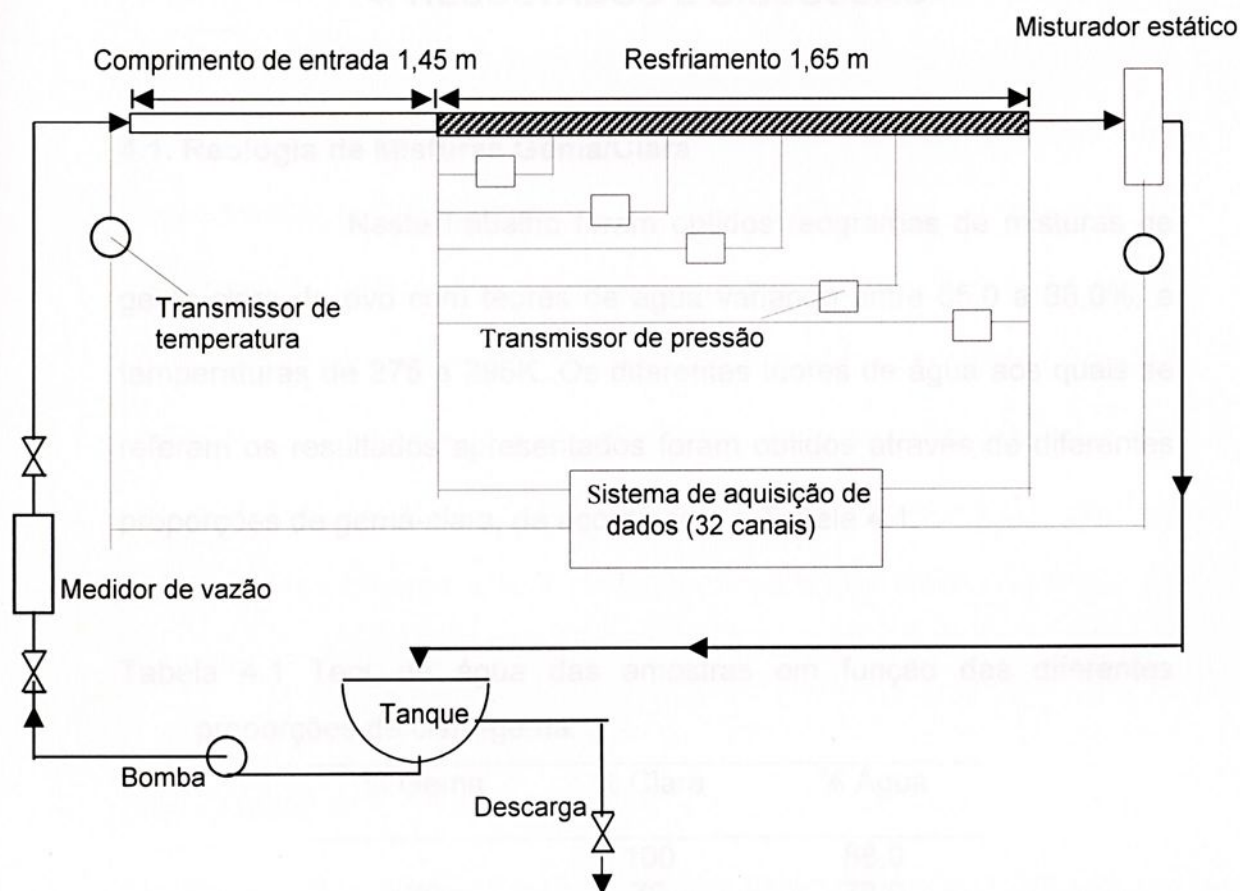


Figura 3.3 Diagrama do equipamento utilizado para as medidas de queda de pressão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Reologia de Misturas Gema/Clara

Neste trabalho foram obtidos reogramas de misturas de gema-clara de ovo com teores de água variando entre 55,0 a 88,0%, e temperaturas de 275 a 295K. Os diferentes teores de água aos quais se referem os resultados apresentados foram obtidos através de diferentes proporções de gema-clara, de acordo com a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Teor de água das amostras em função das diferentes proporções de clara-gema.

% Gema	% Clara	% Água
-	100	88,0
30	70	78,0
50	50	72,0
80	20	62,0
100	-	55,0

As amostras de misturas de ovo tiveram um comportamento não-Newtoniano, tixotrópico, com parâmetros reológicos levemente dependentes do tempo. Apesar da existência de tixotropia, a manifestação do tempo nas curvas de escoamento do material foi analisada considerando modelos para fluidos com comportamento reológico independente do tempo, isto é, os dados experimentais foram ajustados pelo modelo de Ostwald-De Waele utilizando as curvas de

tensão de cisalhamento máxima e tensão de cisalhamento no equilíbrio. Optou-se por esse tipo de análise em virtude da não existência de correlações para a determinação de coeficientes de transferência de calor convectivos e fatores de atrito que levem em conta parâmetros de tixotropia dos fluidos. Dessa forma, tendo em vista que o objetivo maior desse trabalho foi a obtenção de parâmetros reológicos a serem utilizados no projeto de tubulações e equipamentos de troca de calor, decidiu-se por uma abordagem mais prática do assunto, sem a preocupação de modelar e/ou explicar a tixotropia, mas sim determinar o seu efeito no cálculo de parâmetros de projeto.

O modelo reológico de Ostwald-De Waele foi utilizado para analisar os dados experimentais, devido ao fato de ser relativamente simples, de fácil compreensão e com algumas bases em aplicações de hidrodinâmica e transferência de calor. Para o ajuste do modelo reológico aos dados experimentais, foram utilizados os pontos das curvas ascendentes (máxima) e descendentes (equilíbrio).

Baseando-se em trabalhos similares (Cabral, 2000; Guilherme-Branco 1995) para o cálculo dos parâmetros desse modelo, foram desprezadas as taxas de deformação muito altas e muito baixas, totalizando um número de 29 dados para cada um dos experimentos realizados. As altas taxas de deformação foram desprezadas porque no caso de baixas temperaturas, não foi possível trabalhar com altas velocidades de rotação. Além disso, algumas das hipóteses da solução de



Krieger e Elrod (1953) utilizadas para se obter a taxa de deformação poderiam ser violadas. As baixas taxas de deformação também foram desconsideradas porque novamente poderiam violar as hipóteses utilizadas na análise matemática. Portanto, a fim de se obter a mesma representatividade dos dados experimentais, utilizou-se a mesma faixa de taxa de deformação em todas as temperaturas e concentrações estudadas.

4.2. Comportamento Reológico Tixotrópico

A presença da tixotropia na mistura gema-clara foi verificada através dos reogramas, pois os valores das leituras realizadas com velocidades crescentes de rotação foram razoavelmente diferentes das obtidas com velocidades decrescentes. Dessa forma, houve a necessidade da realização de leituras, em todas as temperaturas e concentrações, nos dois sentidos.

Como o objetivo deste trabalho não foi o estudo da tixotropia da mistura gema/clara, os dados serão analisados apenas qualitativamente.

A presença da tixotropia da mistura gema/clara pode ser verificada através das Figuras 4.1 e 4.2. Esses reogramas relacionam tensão de cisalhamento e taxa de deformação. Pode-se observar na Figura 4.1 o lóbulo de histerese em todas as concentrações, indicando a dependência do tempo e caracterizando o material como tixotrópico.



Observa-se também que, quanto menor a fração de água, maior é o lóbulo formado pelas curvas ascendentes e descendentes. Na Figura 4.2 verificamos que na maior temperatura analisada houve uma pequena variação dos valores de tensão de cisalhamento da curva ascendente em relação à descendente, ou seja, a área formada pelas curvas é menor, indicando que, à medida que se aumenta a temperatura, a tixotropia tende a desaparecer.

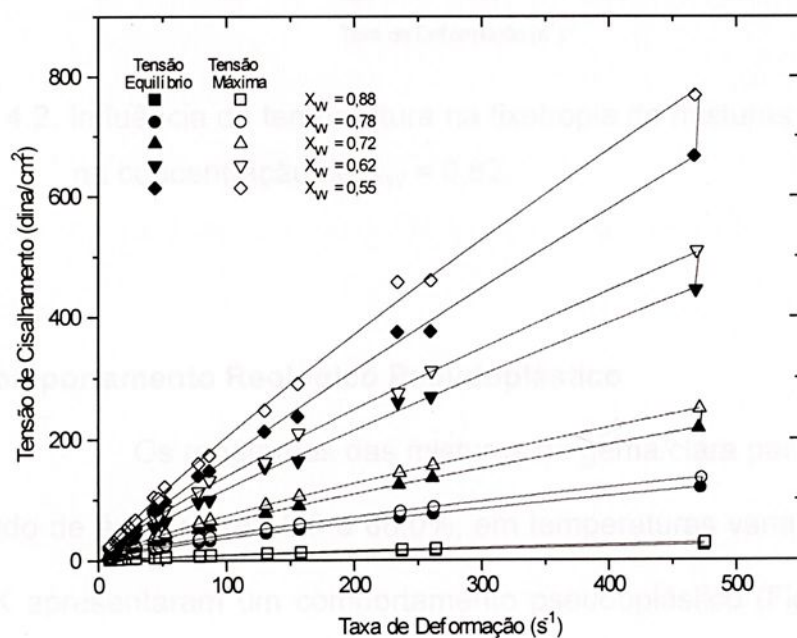


Figura 4.1 Influência da fração de água na tixotropia de misturas gema/clara na temperatura de 275 K.

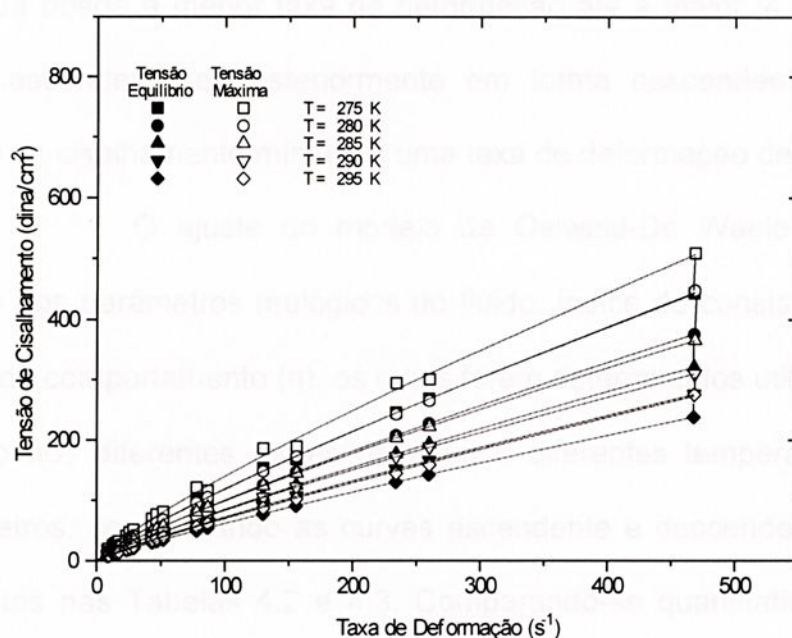


Figura 4.2. Influência da temperatura na tixotropia de misturas gema/clara na concentração de $X_W = 0,62$.

4.3. Comportamento Reológico Pseudoplástico

Os reogramas das misturas de gema/clara para a faixa de conteúdo de água entre 55,0 a 88,0%, em temperaturas variando de 275 a 295K apresentaram um comportamento pseudoplástico (Figuras 4.3 e 4.4). Cabral (2000) estudando a reologia de extrato de café, também obteve um comportamento pseudoplástico, relacionando-o a concentrações intermediárias de água (49,0 a 64,0%). De acordo com Ehlers (1980) este comportamento pode ser atribuído principalmente à presença de proteínas e outras moléculas complexas do ovo.

As leituras no reômetro foram realizadas de forma contínua desde a menor taxa de deformação até a maior ($475,5 \text{ s}^{-1}$) em forma ascendente e posteriormente em forma descendente até uma tensão de cisalhamento mínima a uma taxa de deformação de $8,68 \text{ s}^{-1}$.

O ajuste do modelo de Ostwald-De Waele permitiu o cálculo dos parâmetros reológicos do fluido, índice de consistência (K) e índice de comportamento (n), os quais foram determinados utilizando-se o modelo nos diferentes teores de água e diferentes temperaturas. Tais parâmetros, considerando as curvas ascendente e descendente, podem ser vistos nas Tabelas 4.2 e 4.3. Comparando-se quantitativamente os parâmetros reológicos obtidos para essas curvas, observa-se que a maior diferença no índice de consistência foi de 24,67% ($X_W = 0,620$ e $T = 290 \text{ K}$) e no índice de comportamento do fluido foi de 4,10% ($X_W = 0,88$ e $T = 295 \text{ K}$).

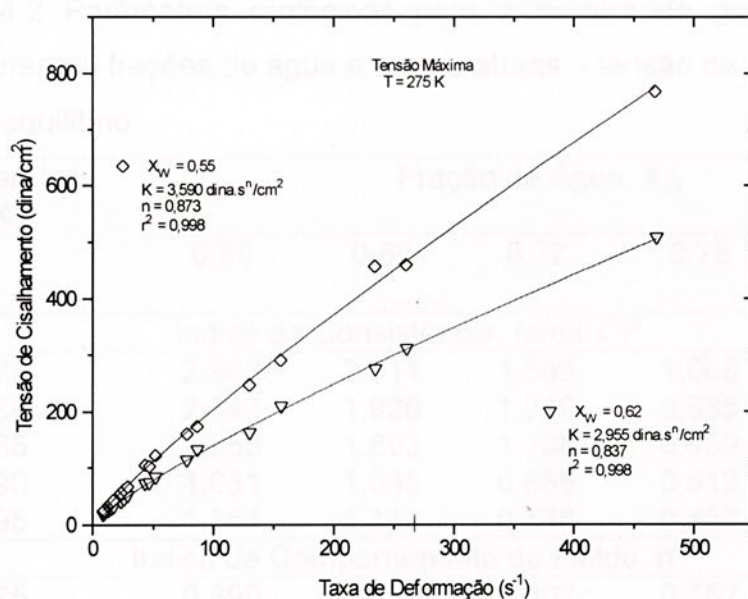


Figura 4.3 Representação do comportamento reológico de misturas gema/clara pelo modelo de Ostwald-De Waele na tensão máxima.

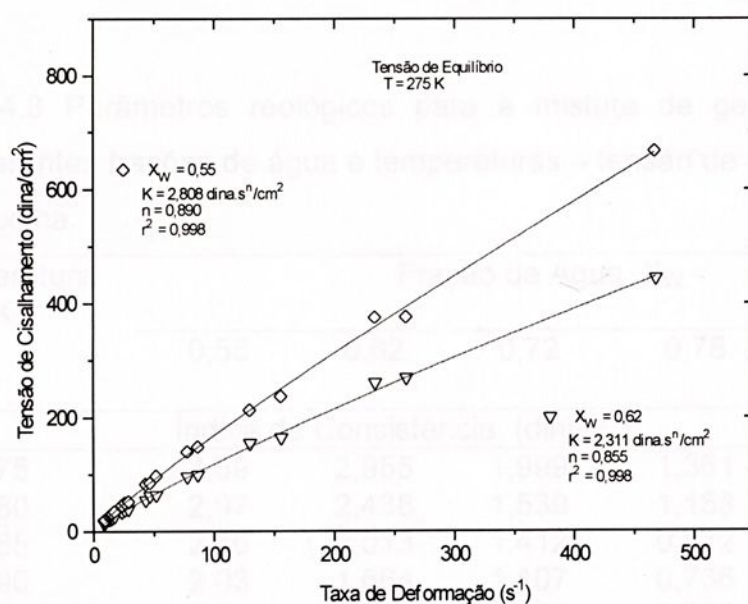


Figura 4.4 Representação do comportamento reológico de misturas gema/clara pelo modelo de Ostwald-De Waele na tensão de equilíbrio.

Tabela 4.2 Parâmetros reológicos para a mistura de gema/clara em diferentes frações de água e temperaturas – tensão de cisalhamento de equilíbrio.

Temperatura (K)	Fração de Água, X_w				
	0,55	0,62	0,72	0,78	0,88
Índice de Consistência, (dina.s ⁿ)*					
275	2,808	2,311	1,565	1,068	0,32
280	2,343	1,926	1,249	0,885	0,26
285	1,955	1,603	1,108	0,689	0,20
290	1,631	1,335	0,855	0,612	0,15
295	1,361	1,112	0,738	0,489	0,12
Índice de Comportamento do Fluido, n^*					
275	0,890	0,855	0,802	0,767	0,71
280	0,890	0,858	0,811	0,779	0,73
285	0,891	0,862	0,819	0,790	0,75
290	0,893	0,867	0,835	0,770	0,76
295	0,896	0,873	0,838	0,814	0,78

*Válido para taxas de deformação entre 8,79 e 475,5 s⁻¹.

Tabela 4.3 Parâmetros reológicos para a mistura de gema/clara em diferentes frações de água e temperaturas – tensão de cisalhamento máxima.

Temperatura (K)	Fração de Água, X_w				
	0,55	0,62	0,72	0,78	0,88
Índice de Consistência, (dina.s ⁿ)*					
275	3,59	2,955	1,999	1,361	0,40
280	2,97	2,438	1,539	1,158	0,30
285	2,46	2,013	1,412	0,872	0,23
290	2,03	1,664	1,107	0,736	0,18
295	1,68	1,376	0,887	0,630	0,14
Índice de Comportamento do Fluido, n^*					
275	0,873	0,837	0,784	0,748	0,694
280	0,873	0,843	0,798	0,767	0,722
285	0,874	0,846	0,804	0,776	0,734
290	0,876	0,850	0,809	0,782	0,742
295	0,880	0,854	0,830	0,764	0,748

*Válido para taxas de deformação entre 8,68 e 468,9 s⁻¹.

Os coeficientes de correlação para todos os ajustes situaram-se na faixa de 0,9978 a 0,9995.

Pode ser visto nas Tabelas 4.2 e 4.3, que o índice de comportamento variou de 0,694 a 0,896, valores menores que a unidade, indicando que nesta faixa de concentração e temperatura as misturas gema-clara são de natureza pseudoplástica. Verifica-se também, que a influência do teor de água foi maior do que a da temperatura. O índice de consistência variou de 0,12 a 3,59 dina.sⁿ/cm².

4.4. Influência da Temperatura nos Parâmetros Reológicos

A fim de se analisar a influência da temperatura sobre os parâmetros reológicos do modelo de Ostwald-De Waele, foram testadas quatro funções clássicas, utilizadas geralmente na área de engenharia para correlacionar a reologia dos fluidos em função da temperatura e da concentração. Estas são equações do tipo linear, exponencial, potencial e parabólica. Além disso, a escolha dessas equações deveu-se ao fato de serem relativamente simples, de fácil aplicação e com uma base teórica no caso da relação exponencial (Arrhenius). As regressões para o ajuste das referidas equações foram realizadas com auxílio do software *Microcal Origin*.

Algumas dessas equações já foram testadas para outros fluidos alimentícios, como suco de cereja clarificado (Giner *et al.*, 1996),



extrato de café (Cabral, 2000), leite concentrado (Vélez-Ruiz & Barbosa-Cánovas, 1998) e purê de pimenta verde (Ahmed *et al.*, 2000).

Para o índice de consistência, o melhor ajuste foi obtido pelo uso de um modelo exponencial, dado pela equação abaixo (4.1), sendo os resultados apresentados a seguir.

$$K = K_{\infty} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4.1)$$

onde:

K = índice de consistência

K_{∞} = fator pré-exponencial.

E_a = energia de ativação do escoamento;

R = constante universal dos gases (1,987 cal/mol K);

T = temperatura absoluta.

A Figura 4.5 mostra o ajuste da equação (4.1) ao índice de consistência do fluido, obtido a partir dos valores de tensão de cisalhamento de equilíbrio em função da temperatura. Observa-se o bom ajuste desta equação para toda a faixa de teor de água estudada. Pode ser visto também, que o efeito da temperatura foi mais acentuado para a proporção gema/clara de menor concentração de água, ou seja, com um teor de água de 55%. Na Figura 4.6 é mostrado o mesmo ajuste, porém com os índices de consistência ajustados com os dados de tensão de cisalhamento máxima.

Os parâmetros da equação (4.1) e os respectivos coeficientes de correlação para os diferentes teores de água são mostrados nas Tabelas 4.4 e 4.5. Os valores determinados para a energia de ativação são comparáveis aos obtidos por Hernández *et al.* (1995) para suco de laranja e Tang *et al.* (1993) para soluções de proteína concentrada.

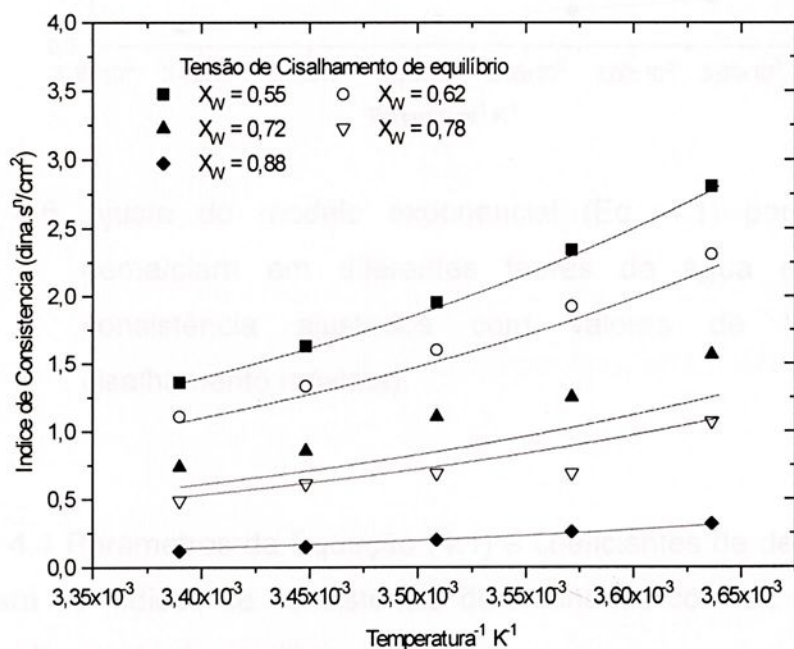


Figura 4.5 Ajuste do modelo exponencial (eq. 4.1) para misturas gema/clara com diferentes teores de água (Índices de consistência ajustados com valores de tensão de cisalhamento de equilíbrio).

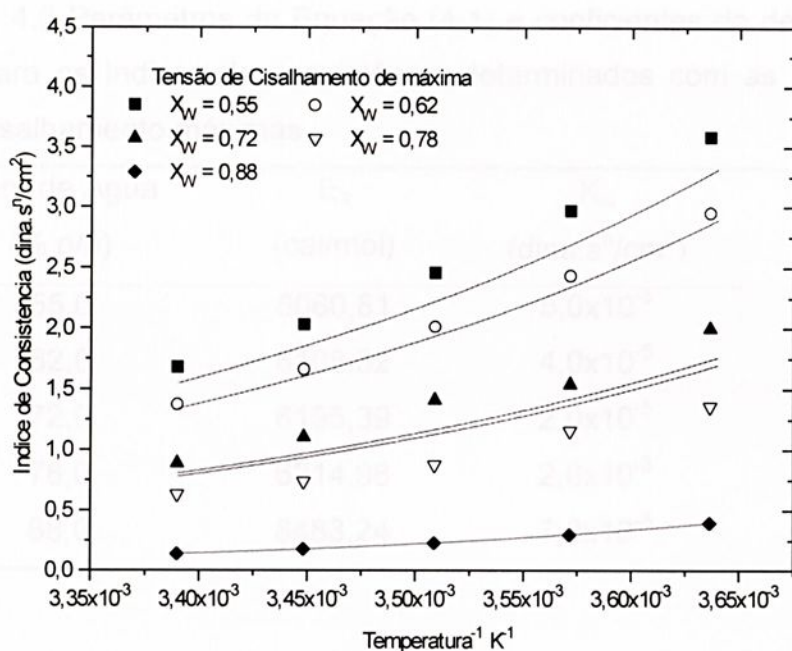


Figura 4.6 Ajuste do modelo exponencial (Eq. 4.1) para misturas gema/clara em diferentes teores de água (índices de consistência ajustados com valores de tensão de cisalhamento máxima).

Tabela 4.4 Parâmetros da Equação (4.1) e coeficientes de determinação para os índices de consistência determinados com as tensões de cisalhamento de equilíbrio.

Teor de Água (% p/p)	E_a (cal/mol)	K_∞ (dina.s ⁿ /cm ²)	R^2
55,0	5784,75	$7,0 \times 10^{-5}$	0,996
62,0	5843,41	$5,0 \times 10^{-5}$	0,998
72,0	6034,42	$2,0 \times 10^{-5}$	0,990
78,0	5955,89	$2,0 \times 10^{-5}$	0,762
88,0	7846,98	$2,0 \times 10^{-7}$	0,995

Tabela 4.5 Parâmetros da Equação (4.1) e coeficientes de determinação para os índices de consistência determinados com as tensões de cisalhamento máximas.

Teor de Água (% p/p)	E_a (cal/mol)	K_∞ (dina.s ⁿ /cm ²)	R^2
55,0	6060,81	$5,0 \times 10^{-5}$	0,999
62,0	6108,32	$4,0 \times 10^{-5}$	0,999
72,0	6195,39	$2,0 \times 10^{-5}$	0,981
78,0	6214,98	$2,0 \times 10^{-5}$	0,988
88,0	8483,24	$7,0 \times 10^{-8}$	0,999

Vélez-Ruiz & Barbosa-Cánovas (1998) estudaram o efeito da temperatura nos parâmetros reológicos do leite concentrado utilizando o modelo de Ostwald-De Waele e obtiveram resultados semelhantes. O índice de consistência, K , do leite concentrado foi maior para as temperaturas mais baixas.

Segundo esses mesmos autores, o efeito da temperatura sobre o índice de comportamento do fluido foi adequadamente representado pela função exponencial abaixo:

$$n = A \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (4.2)$$

onde A e B são constantes empíricas a serem determinadas para cada concentração e T é a temperatura absoluta.

A equação (4.2) também se mostrou satisfatória para o ajuste dos índices de comportamento das misturas clara-gema. Os

resultados são apresentados nas Figuras 4.7 e 4.8 para os valores de n determinados com as tensões de cisalhamento de equilíbrio e máxima, respectivamente. Observa-se que a temperatura exerceu pouca influência no índice de comportamento do fluido na faixa de conteúdo de água considerada. Além disso, com o aumento da temperatura, houve uma tendência do fluido aproximar-se do comportamento Newtoniano, isto é, n aproximou-se de 1.

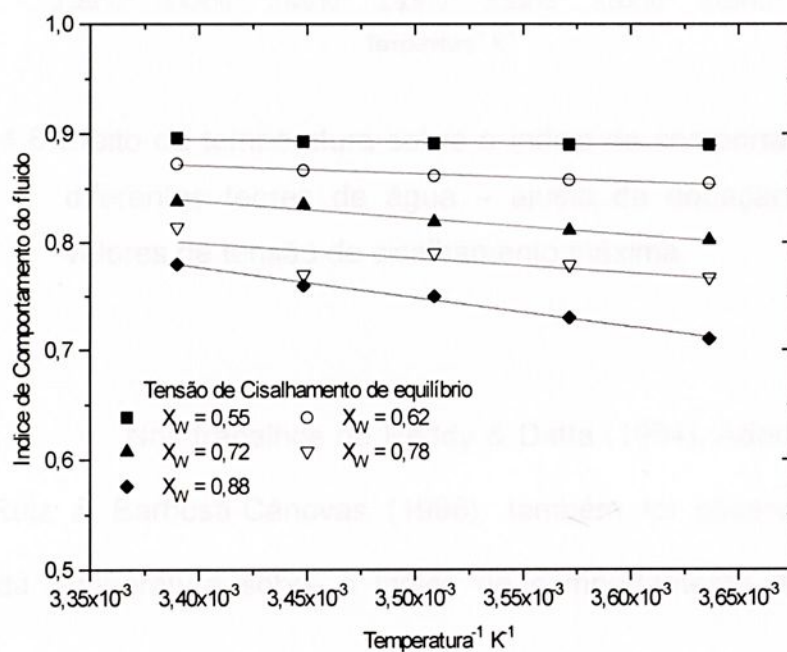


Figura 4.7 Efeito da temperatura sobre o índice de comportamento para diferentes teores de água – ajuste da equação (4.2) com valores de tensão de cisalhamento de equilíbrio.

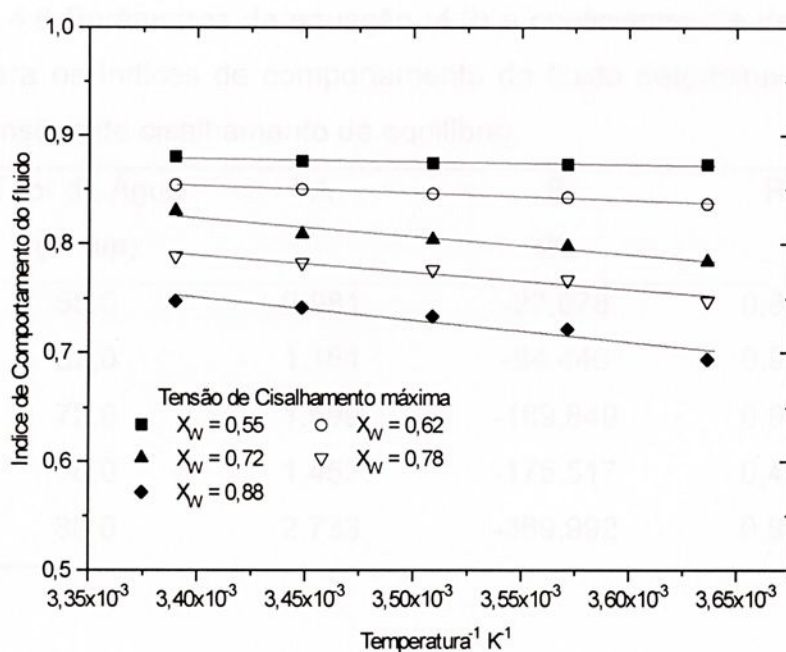


Figura 4.8 Efeito da temperatura sobre o índice de comportamento para diferentes teores de água – ajuste da equação (4.2) com valores de tensão de cisalhamento máxima.

Nos trabalhos de Reddy & Datta (1994), Adorno (1997) e Vélez-Ruiz & Barbosa-Cánovas (1998), também foi observado que o efeito da temperatura sobre o índice de comportamento do fluido foi mínimo.

As Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam os valores determinados para as constantes empíricas da equação (4.2), utilizando as tensões de equilíbrio e máxima, respectivamente.

Tabela 4.6 Parâmetros da equação (4.2) e coeficientes de determinação para os índices de comportamento do fluido determinados com as tensões de cisalhamento de equilíbrio.

Teor de Água (% p/p)	A	B (K)	R ²
55,0	0,981	-27,078	0,852
62,0	1,161	-84,446	0,978
72,0	1,599	-189,849	0,971
78,0	1,452	-175,517	0,495
88,0	2,733	-369,992	0,990

Tabela 4.7 Parâmetros da equação (4.2) e coeficientes de determinação para os índices de comportamento do fluido determinados com as tensões de cisalhamento máximas.

Teor de Água (% p/p)	A	B (K)	R ²
55,0	0,977	-31,252	0,816
62,0	1,115	-78,709	0,991
72,0	1,668	-207,575	0,934
78,0	1,558	-200,017	0,934
88,0	1,983	-285,473	0,904

4.5. Influência da Fração de Água nos Parâmetros Reológicos

A influência da fração de água sobre os parâmetros reológicos das misturas clara-gema foi determinada testando-se as mesmas funções clássicas já mencionadas anteriormente: linear,

exponencial, potencial e parabólica. O software *Microcal Origin* foi utilizado para as regressões de ajuste dos parâmetros do modelo de Ostwald-De Waele.

Para ambos os parâmetros, K e n, os melhores resultados foram obtidos com o uso de funções exponenciais.

Para o índice de consistência, K, o modelo utilizado tem a seguinte forma:

$$K = A \exp(B X_w) \quad (4.3)$$

onde:

K = índice de consistência;

A e B = constantes empíricas do modelo exponencial;

X_w = fração de água na mistura gema/clara.

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram o índice de consistência determinado com tensões de cisalhamento de equilíbrio e máxima, respectivamente, em função da fração de água para a faixa de temperatura testada. Observa-se que existiu uma tendência ao aumento do índice de consistência com o decréscimo da fração de água.

O índice de consistência está relacionado com o tamanho das partículas presentes no fluido e mede a resistência à destruição dos agregados pelo cisalhamento. Sua redução em função do aumento do teor de água, poderia estar relacionado com o efeito lubrificante do solvente entre as macromoléculas constituintes do fluido.

Os valores obtidos para as constantes empíricas da equação (4.3) encontram-se nas Tabelas 4.8 e 4.9, utilizando as tensões de equilíbrio e máxima, respectivamente.

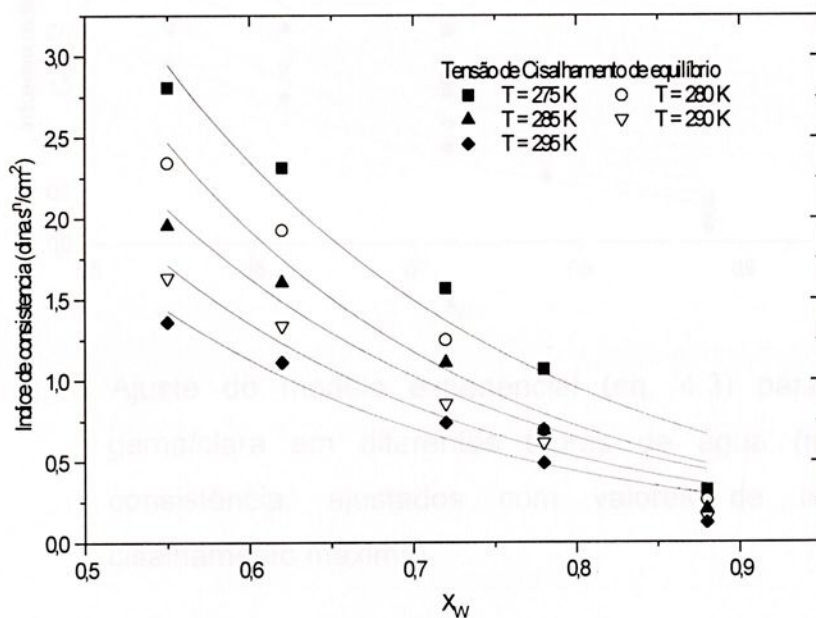


Figura 4.9 Ajuste do modelo exponencial (eq. 4.3) para misturas gema/clara em diferentes teores de água (índices de consistência ajustados com valores de tensão de cisalhamento de equilíbrio).

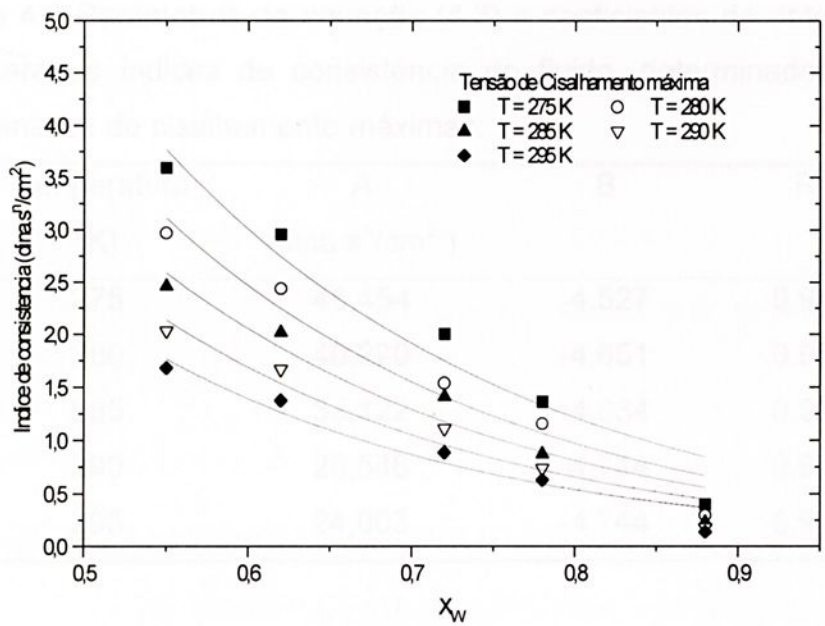


Figura 4.10 Ajuste do modelo exponencial (eq. 4.3) para misturas gema/clara em diferentes teores de água (índices de consistência, ajustados com valores de tensão de cisalhamento máxima).

Tabela 4.8 Parâmetros da equação (4.3) e coeficientes de determinação para os índices de consistência do fluido determinados com as tensões de cisalhamento de equilíbrio.

Temperatura (K)	A (dina.s ⁿ /cm ²)	B	R ²
275	35,233	-4,511	0,948
280	37,335	-4,938	0,952
285	26,278	-4,632	0,942
290	23,004	-4,723	0,948
295	19,402	-4,740	0,944

Tabela 4.9 Parâmetros da equação (4.3) e coeficientes de determinação para os índices de consistência do fluido, determinados com as tensões de cisalhamento máximas.

Temperatura (K)	A (dina.s ⁿ /cm ²)	B	R ²
275	45,454	-4,527	0,947
280	40,220	-4,651	0,951
285	33,122	-4,634	0,936
290	28,546	-4,714	0,943
295	24,003	-4,744	0,944

Resultados semelhantes para o índice de consistência em função do conteúdo de sólidos solúveis foram encontrados para outros fluidos como o purê de tomate (Rao & Cooley, 1983), suco de laranja (Hernández *et al.*, 1995) e leite concentrado (Vélez-Ruiz & Barbosa-Cánovas, 1998).

O índice de comportamento das misturas em função da fração de água, foi ajustado satisfatoriamente pela função exponencial proposta por Vélez-Ruiz & Barbosa-Cánovas (1998), dada pela seguinte equação:

$$n = A \exp(B X_W) \quad (4.4)$$

onde: A e B são constantes empíricas a serem determinadas para cada concentração e X_W é a fração de água na mistura gema/clara.

Os ajustes da equação (4.4) aos dados experimentais das tensões de cisalhamento de equilíbrio e máxima são mostrados nas Figuras 4.11 e 4.12 respectivamente. Observa-se que houve uma

influência considerável da fração de água no índice de comportamento do fluido, que diminuiu com o aumento do teor de água nas misturas. A primeira vista esperar-se-ia o contrário, uma vez que a água pura tem comportamento Newtoniano e o aumento de sua concentração nas amostras deveria fazer com que o parâmetro n se aproximasse da unidade. Por outro lado, as amostras com maior teor de água correspondem a amostras com maior proporção de clara e essa pode ser a razão para o comportamento observado neste trabalho.

As constantes da equação (4.4) são apresentadas nas Tabelas 4.10 e 4.11.

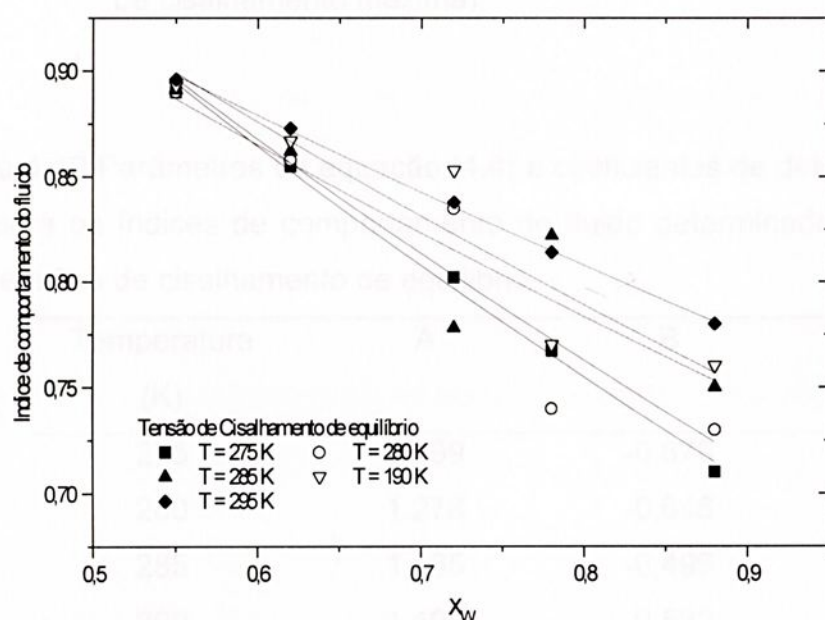


Figura 4.11 Ajuste do modelo exponencial (eq. 4.4) para misturas gema/clara em diferentes teores de água (índices de comportamento do fluido ajustados com valores de tensão de cisalhamento de equilíbrio).

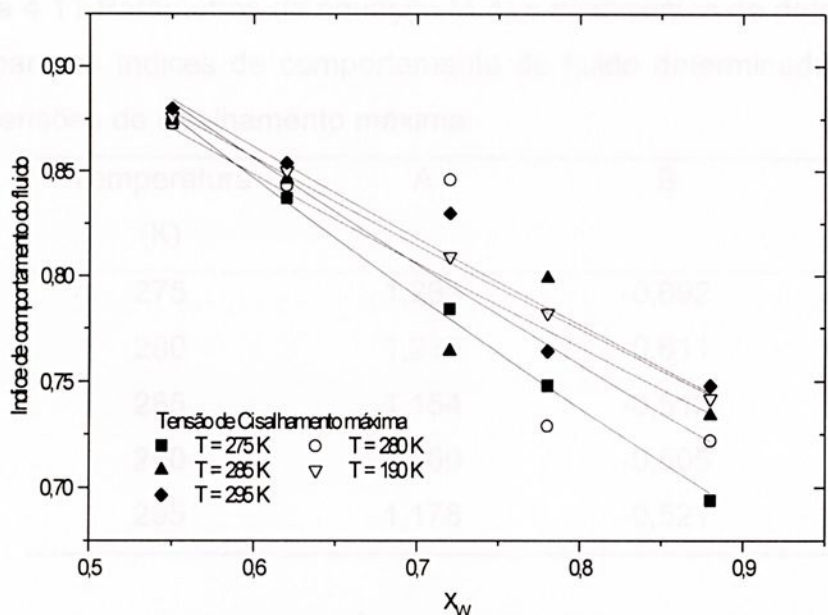


Figura 4.12 Ajuste do modelo exponencial (eq. 4.4) para misturas gema/clara em diferentes teores de água (índices de comportamento do fluido ajustados com valores de tensão de cisalhamento máxima).

Tabela 4.10 Parâmetros da equação (4.4) e coeficientes de determinação para os índices de comportamento do fluido determinados com as tensões de cisalhamento de equilíbrio.

Temperatura (K)	A	B	R ²
275	1,299	-0,679	0,996
280	1,278	-0,646	0,896
285	1,165	-0,496	0,823
290	1,198	-0,522	0,881
295	1,133	-0,422	0,999

Tabela 4.11 Parâmetros da equação (4.4) e coeficientes de determinação para os índices de comportamento do fluido determinados com as tensões de cisalhamento máxima.

Temperatura (K)	A	B	R ²
275	1,283	-0,692	0,997
280	1,235	-0,611	0,800
285	1,154	-0,512	0,861
290	1,160	-0,505	0,998
295	1,178	-0,521	0,933

4.6. Efeito Combinado da Temperatura e Fração de Água nos Parâmetros Reológicos do Fluido

Verificou-se anteriormente que a temperatura e a fração de água são fatores que afetam os parâmetros reológicos das misturas de clara-gema. Nos processos industriais de ovo desidratado ou ovo líquido pasteurizado, os quais envolvem a secagem, o bombeamento e a troca de calor, a correlação desses parâmetros é de grande importância prática. Dessa forma, procurou-se obter modelos empíricos que fossem capazes de prever os parâmetros reológicos considerando, simultaneamente, a influência da temperatura e fração de água.

As faixas de temperatura e fração de água consideradas para a determinação das correlações, foram as mesmas já apresentadas nos itens anteriores. As constantes das equações foram obtidas através de

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

O efeito combinado da temperatura e fração de água sobre o índice de consistência, K , do modelo de Ostwald-De Waele, pode ser representado pelas equações (4.5) e (4.6), considerando as tensões de cisalhamento de equilíbrio e máxima respectivamente.

$$K_{\text{Equilíbrio}} = 9,45 \times 10^{-4} \exp(5804,5 / (1,987 \times T)) \exp(-4,682 X_W) \quad (4.5)$$

$$R^2 = 0,955$$

$$K_{\text{Máxima}} = 7,10 \times 10^{-4} \exp(6074,4 / (1,987 \times T)) \exp(-4,617 X_W) \quad (4.6)$$

$$R^2 = 0,955$$

Os valores dos coeficientes de determinação mostram que o ajuste de cada equação foi adequado, o que também pode ser comprovado através da Figura 4.13, que mostra a concordância entre os valores experimentais e preditos pela equação (4.6).

Os gráficos tridimensionais mostrados nas Figuras 4.14 e 4.15 ilustram os efeitos combinado da temperatura e concentração nos parâmetros reológicos das misturas gema-clara considerando os parâmetros ajustados a partir das curvas de tensão de equilíbrio e máximas.

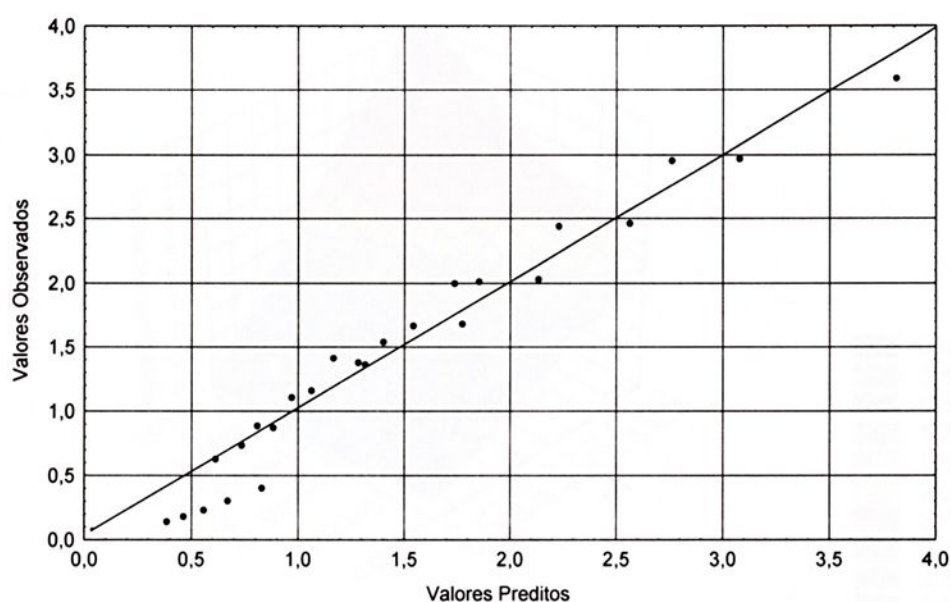


Figura 4.13 Correlação entre resultados experimentais e valores estimados para o índice de consistência do fluido (eq. 4.6).

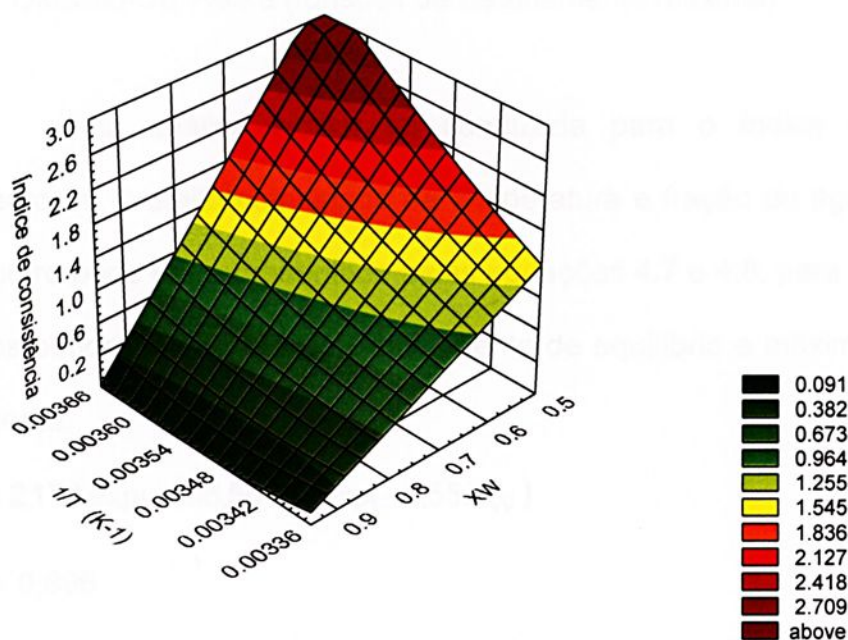


Figura 4.14 Influência da temperatura e da fração de água no índice de consistência da mistura gema/clara para o modelo de Ostwald-De Waele (tensões de cisalhamento de equilíbrio).

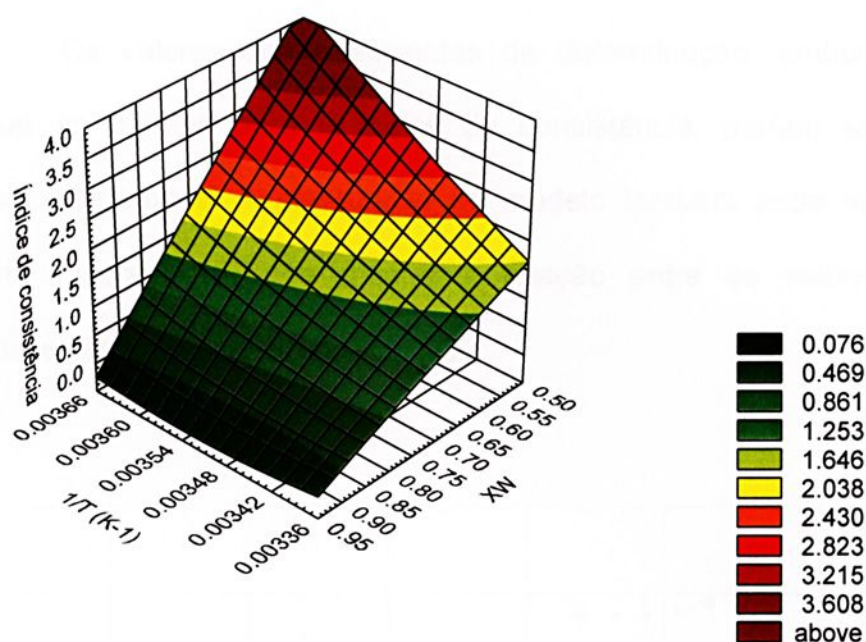


Figura 4.15 Influência da temperatura e da fração de água no índice de consistência da mistura gema/clara para o modelo de Ostwald-De Waele (tensões de cisalhamento máxima).

Uma análise similar foi conduzida para o índice de comportamento, n . O efeito combinado da temperatura e fração de água neste parâmetro pode ser representado pelas equações 4.7 e 4.8, para os experimentos obtidos na tensão de cisalhamento de equilíbrio e máxima, respectivamente.

$$\eta_{\text{Equilíbrio}} = 2,173 \exp(-166,55 / T) \exp(-0,55 X_W) \quad (4.7)$$

$$R^2 = 0,896$$

$$\eta_{\text{Máximo}} = 1,869 \exp(-126,18 / T) \exp(-0,57 X_W) \quad (4.8)$$

$$R^2 = 0,898$$

Os valores dos coeficientes de determinação, embora menores que os obtidos para o índice de consistência, podem ser considerados satisfatórios. A adequação do modelo também pode ser verificada na Figura 4.16, que mostra a relação entre os valores experimentais e preditos pela equação (4.7).

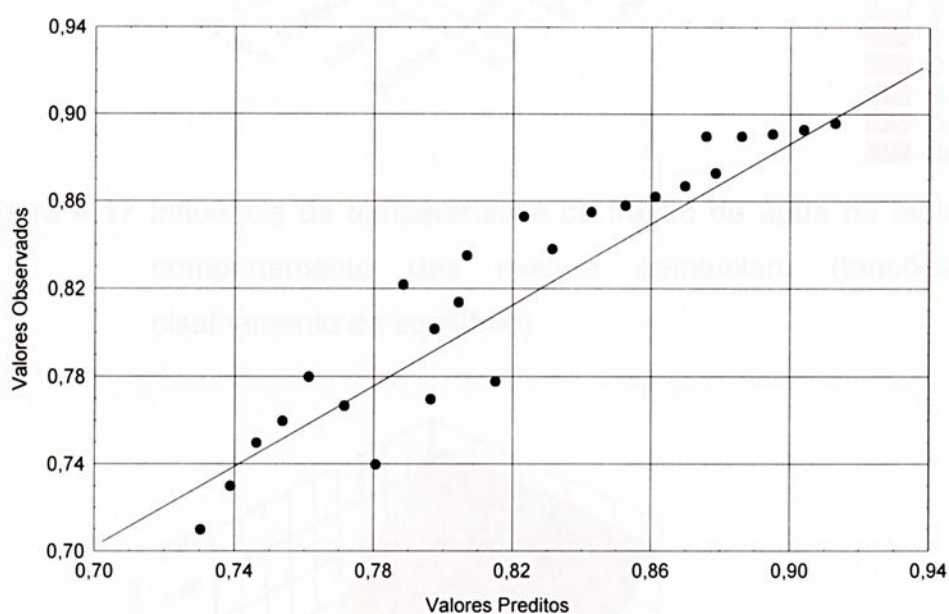


Figura 4.16 Correlação entre resultados experimentais e valores estimados para o índice de comportamento do fluido (eq. 4.7).

As Figuras 4.17 e 4.18 ilustram o efeito combinado da temperatura e concentração no índice de comportamento das misturas gema/clara para dados ajustados às curvas de tensões de cisalhamento de equilíbrio e máximas.

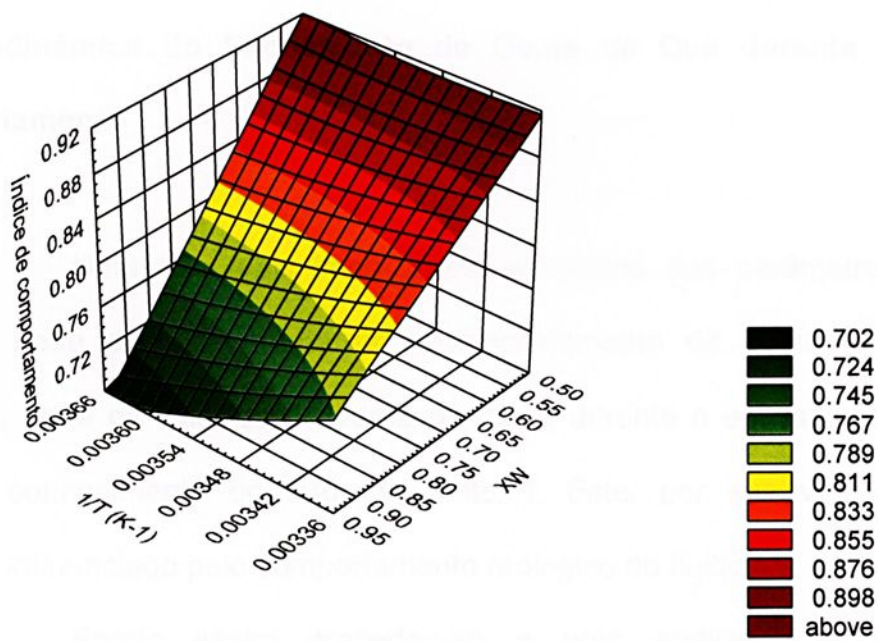


Figura 4.17 Influência da temperatura e da fração de água no índice de comportamento das mistura gema/clara (tensões de cisalhamento de equilíbrio).

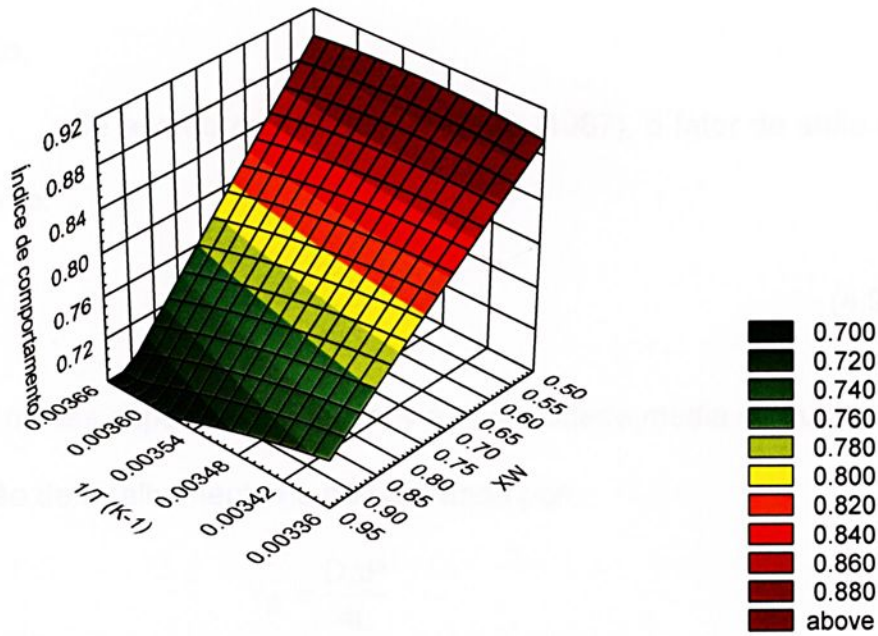


Figura 4.18 Influência da temperatura e da fração de água no índice de comportamento da mistura gema/clara para o modelo de Ostwald-De Waele (tensões de cisalhamento máximas).

4.7. Hidrodinâmica do Escoamento de Gema de Ovo durante o Resfriamento

Uma das mais importantes aplicações dos parâmetros reológicos pode ser encontrada no dimensionamento de bombas e tubulações, onde os cálculos de perda de carga durante o escoamento exigem o conhecimento do fator de atrito, f . Este, por sua vez, é fortemente influenciado pelo comportamento reológico do fluido.

Sendo assim procedeu-se a uma análise visando demonstrar a utilização dos resultados experimentais obtidos nos itens anteriores e a influência da tixotropia nos cálculos de fatores de atrito durante o escoamento de gema pura submetida a um processo de resfriamento.

De acordo com Garcia & Steffe (1987), o fator de atrito é definido como:

$$f = \frac{2\tau_p}{\rho v^2} \quad (4.9)$$

onde ρ é a massa específica do fluido, v é a velocidade média do fluido, e τ_p é a tensão de cisalhamento na parede, dada por:

$$\tau_p = \frac{D\Delta P}{4L} \quad (4.10)$$

Na equação (4.10), D é o diâmetro do tubo e ΔP é a queda de pressão observada no comprimento L do tubo.

No caso do escoamento laminar, o fator de atrito pode ser obtido a partir de uma simples função do número de Reynolds generalizado, o qual é idêntico à equação de Hagen-Poiseuille (Darby, 1996)

$$f = \frac{16}{Re_g} \quad (4.11)$$

onde:

$$Re_g = \frac{D^n v^{(2-n)} \rho}{8^{(n-1)} K} \left(\frac{4n}{1+3n} \right)^n \quad (4.12)$$

As equações (4.11) e (4.12) podem ser utilizadas tanto para fluidos newtonianos como para fluidos pseudoplásticos que obedecem o modelo de Ostwald-De Waele, desde que para fluidos Newtonianos n seja igual a 1 e K igual a μ , de tal maneira que o número de Reynolds generalizado (eq. 4.12) se reduza a $Re = Dvp/\mu$.

De acordo com Rao & Anantheswaran (1982), devido ao comportamento não-Newtoniano ser altamente viscoso, escoamentos laminares são encontrados mais freqüentemente que escoamentos turbulentos. Os argumentos apresentados para esta hipótese são o fato de que altas pressões de bombeamento não são econômicas para sustentar um escoamento turbulento nessas condições, além de que os números de Reynolds de transição de fluidos pseudoplásticos são maiores que os correspondentes a fluidos Newtonianos.

Sob condições turbulentas, as correlações que existem para estimar o fator de atrito são semi-empíricas. Para fluidos Ostwald-De Waele, provavelmente a melhor correlação é a apresentada por Dodge & Metzner (1959), a qual é baseada na equação de Von Karman:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{4}{n^{0,75}} \log(\text{Re}_g \cdot f^{(1-n/2)}) - \frac{0,4}{n^{1,2}} \quad (4.13)$$

Ao contrário da equação de Colebrook para fluidos Newtonianos, na equação (4.13) não está presente o efeito da rugosidade do tubo. Segundo Darby (1996), há evidências de que a rugosidade não é significativa para fluidos não-Newtonianos quando comparado com a dos fluidos Newtonianos. Isto talvez deva-se ao fato de que a maioria dos fluidos não-Newtonianos escoam com baixos números de Reynolds e, particularmente, porque a camada limite laminar tende a ser maior que para fluidos Newtonianos.

Neste trabalho foram obtidos dados experimentais de queda de pressão durante o resfriamento de gema, os quais foram utilizados para determinar o fator de atrito de acordo com equações (4.9) e (4.10). As densidades foram determinadas na temperatura média entre as condições iniciais e finais atingidas durante o escoamento, utilizando uma equação empírica desenvolvida por Coimbra *et al.* (2001) e correlacionados de acordo com a equação (4.14).

$$\rho = 978,54 + 72,62X_w - 0,15T \quad (4.14)$$

onde: ρ é a massa específica em kg/m^3 , T é a temperatura em $^{\circ}\text{C}$ e X_w a fração de água.

Para o escoamento de gema, o fator de atrito obtido experimentalmente foi correlacionado em função do número de Reynolds, com os índices de consistência e de comportamento do fluido obtidos a partir das equações (4.5) e (4.7) para as tensões de equilíbrio e (4.6) e (4.8) para as tensões máximas, nas mesmas temperaturas utilizadas na determinação da densidade.

Estes resultados são mostrados na Figura 4.19, a qual apresenta o diagrama de Moody para a gema de ovo. Na região laminar de escoamento ($Re_g < 2000$), o erro relativo obtido pela equação (4.15) indicou um bom ajuste entre os valores experimentais e os preditos – o erro mínimo foi de 5.83% com um máximo de 8.33%.

$$\Delta\%erro = 100 \frac{|observado - predito|}{observado} \quad (4.15)$$



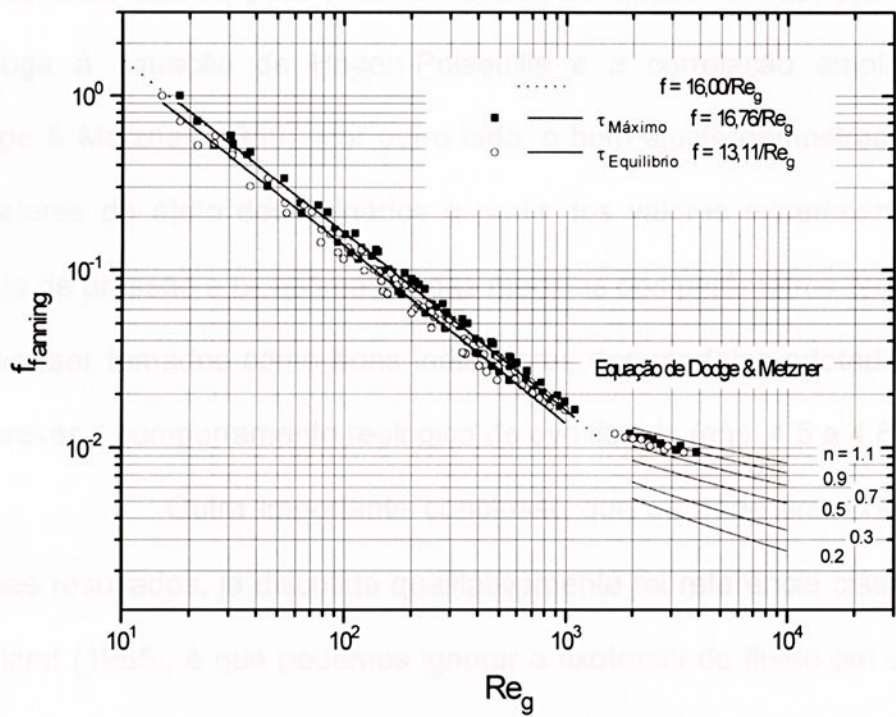


Figura 4.19 Fatores de atrito experimentais e preditos para gema de ovo utilizando os parâmetros reológicos do modelo de Ostwald-De Waele ignorando seu comportamento tixotrópico.

Na figura 4.19 também são apresentados valores do fator de atrito para números de Reynolds maiores que 2000, fora da faixa de escoamento laminar. Esses dados podem ser comparados com os obtidos pela equação de Dodge & Metzner (1959) (eq. 4.13), representados pelas linhas sólidas para diferentes índices de comportamento do fluido, n . Observa-se um bom ajuste dos resultados experimentais à equação, sendo o erro relativo médio de 3.98% com um máximo de 7.84%.

Os dados apresentados na Figura 4.19 são de considerável importância, uma vez que o bom ajuste dos modelos aos

pontos experimentais confirma a adequação das correlações já amplamente aceitas para predizer fatores de atrito – a equação teórica análoga à equação de Hagen-Poiseuille e a correlação empírica de Dodge & Metzner (1959). Por outro lado, o bom ajuste demonstrado entre os fatores de atrito determinados a partir dos valores experimentais de queda de pressão e os estimados das medidas dos parâmetros reológicos podem ser tomados como bons indicadores dos modelos adotados para descrever o comportamento reológico de ovo líquido (eqs. 4.5 a 4.8).

Outra importante conclusão que se pode tirar com base nesses resultados, já discutida qualitativamente na referência clássica de Skelland (1965), é que podemos ignorar a tixotropia do fluido em estudo, obtendo os parâmetros reológicos por meio de modelos empíricos que ignorem a dependência da reologia com o tempo, e posteriormente poder obter os fatores de atrito. Entretanto, é importante observar a diferença existente entre os fatores de atrito obtidos a partir dos dados de tensão de cisalhamento máxima e de equilíbrio, sendo os primeiros sempre maiores, como seria de se esperar. Isso leva à conclusão que a determinação de fatores de atrito de fluidos que apresentem comportamento tixotrópico deve ser sempre feita partindo dos reogramas obtidos em taxas de deformação ascendentes.



5. CONCLUSÕES

1. As misturas de gema-clara, na faixa de teores de água de 55 a 88% e temperaturas entre 275 e 295 K mostraram ter comportamento tixotrópico.
2. Ignorando a existência da tixotropia, os reogramas puderam ser representados para tensões máximas e de equilíbrio, pelo modelo de Ostwal-De Wale, cujos parâmetros independem do tempo.
3. Os efeitos da temperatura e da fração de água sobre os parâmetros reológicos do fluido tanto para tensões máximas como de equilíbrio pode ser representado por funções exponenciais obtendo-se um bom ajuste aos dados experimentais.
4. Modelos empíricos incluindo o efeito combinado da temperatura e da fração de água também foram adequadamente ajustados aos parâmetros reológicos das amostras analisadas, os quais são de grande importância prática. Tais modelos são apresentados a seguir:

Para tensão de equilíbrio:

$$K_{\text{Equilíbrio}} = 9,45 \times 10^{-4} \exp(5804,5 / (1,987 \times T)) \exp(-4,682X_W)$$

$$\eta_{\text{Equilíbrio}} = 2,173 \exp(-166,55 / T) \exp(-0,55X_W)$$

Para tensão máxima:

$$K_{\text{Máxima}} = 7,10 \times 10^{-4} \exp(6074,4 / (1,987 \times T)) \exp(-4,617X_W)$$

$$\eta_{\text{Máximo}} = 1,869 \exp(-126,18 / T) \exp(-0,57X_W)$$

5. Os fatores de atrito obtidos experimentalmente durante o resfriamento de gema de ovo através de tubos foram satisfatoriamente reproduzidos pelo uso de uma equação análoga à equação de Hagen-Poiseuille, no caso de escoamento laminar, e à equação de Dodge & Metzner (1959) para o escoamento turbulento. A boa concordância entre os valores preditos e observados confirma a validade das equações propostas para descrever o comportamento do escoamento de ovo líquido.
6. Foi demonstrado que a utilização de modelos empíricos para a determinação de fatores de atrito em fluidos que apresentem comportamento reológico dependente do tempo deve ser feita com base em parâmetros determinados a partir da tensão de cisalhamento máxima, os quais levarão a maiores fatores de atrito e à escolha de bombas de maior potência.



6. SUGESTÕES

Mediante os resultados, conclusões e desenvolvimento deste trabalho, novas investigações mostram-se interessantes para ampliar a compreensão de outros fenômenos envolvendo a mistura de ovo. Portanto, têm-se as seguintes sugestões:

1. Determinação experimental de fatores de atrito em dutos retangulares e anulares visando a aplicação para trocadores de calor com esta geometria.
2. Determinação experimental do coeficiente de transferência de calor convectivo de gema, clara e misturas.
3. Determinação experimental da perda de carga em acessórios e válvulas para escoamento com gema, clara e misturas de ovo, principalmente visando a influência do tempo.



7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ADORNO, R.A.C. Reologia de Sucos de Frutas Tropicais: Manga, Maracujá, Mamão e Goiaba. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, 1997.
- AHMED, J., SHIVHARE, U.S. & RAGHAVAN, G.S.V. Rheological characteristics and kinetics of colour degradation of green chilli puree. Journal of Food Engineering, 44, 239-244, 2000.
- BHATTACHARYA, S. & RASTOGI, N.K. Rheological properties of enzyme-treated mango pulp. Journal of Food Engineering, 36, 249-262, 1998.
- BRANCO, I.G. Comportamento Reológico de Suco de Laranja a Baixas Temperaturas. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, 1995.
- BRIGGS, J.L. & STEFFE, J.F. Kinetic energy correction factor of Herchel Bulkley fluid. Journal of Food Processing Engineering, 18, 115-118, 1995.
- CABRAL, R.A.F. Influencia da Temperatura e Fração de Agua nos Parametros Reologicos do Extrato de Cafe. Tese de Mestrado. Instituto de Biociencias Letras e Ciencias Exatas, UNESP, 2000.
- COIMBRA, J.S.R., GABAS, A.L.G., MINIM, L.A. & TELIS-ROMERO, J., Comunicação pessoal, 2001.
- DARBY, R. Chemical Engineering Fluid Mechanics. Marcel Dekker, New York, 1996.
- DODGE, D.W. and METZNER, A.B. Turbulent flow of non-Newtonian systems. A.I.Ch.E. Journal, 5, 189-204, 1959.



- EHLERS, G.M. Possible applications of enzymes in coffee processing. In 9th International Scientific Colloquium on Coffee. London. ASIC, Paris p. 101-108, 1980.
- GARCIA, E.J. and STEFFE, J.F. Comparison of friction factor equations for non-Newtonian fluids in pipe flow. J. Food Process Eng. 9, 93-120, 1987.
- GINER, J., IBARZ, A., GARZA, S. & XHIAN-QUAN, S. Rheology of clarified cherry juices. Journal of Food Engineering, 30, 147-154, 1996.
- GOVIER, G.W. & AZIZ, K. The Flow of Complex Mixtures in Pipes. Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1972.
- GUERRERO, S.N. & ALZAMORA, S.M. Effect of pH, temperature and glucose addition on flow behavior of fruit purées I. Banana purée. Journal of Food Engineering, 33, 239-256, 1997.
- GUERRERO, S.N. & ALZAMORA, S.M. Effect of pH, temperature and glucose addition on flow behavior of fruit purées II. Peach, Papaya and Manga purée. Journal of Food Engineering, 37, 77-101, 1998.
- HERNÁNDEZ, E., CHEN, C.S., JONHSON, J. & CARTER, R.D. Viscosity changes in orange juice after ultrafiltration and evaporation. Journal of Food Engineering, 25, 387-392, 1995.
- IBARZ, A. & SINTES, J. Rheology of Egg Yolk. Journal of Texture Studies. v20., p. 161-167, 1989.
- IBARZ, A. & SEGALES, J. Influencia de la Congelacion en la Reologia de Yema de Huevo com Sal. Alimentaria, v10., p. 69-76, 1995.
- KRIEGER, L.M. & ELROD, H. Direct determination of the flow curves of non-newtonian fluids. II. Shearing rate in the concentric cylinder viscometer. Journal of Applied Physics, v.2, n.24, 134-136, 1953.



- MIZRAHI, S. Irreversible shear thinning and thickening of tomato juice. Journal of Food Processing and Preservation, 21, 267-277, 1997.
- PITSILIS, J. G., BROOKER, D.B., COTTERILL, O. J. & WALTON, H.V. Rheological Properties of plain egg yolk, salted egg yolk and salted whole egg. Transactions of the ASAE 294-299, 1984.
- PITSILIS, J. G., BROOKER, D.B., WALTON, H.V. & COTTERILL, O. J. Rheological Properties of liquid egg white. Transactions of the ASAE, 300-304, 1984.
- RAO, M.A. and ANANTHESWARAN, R.C. Rheology of fluids in food processing. Food Technol. 36, 116-126, 1982.
- RAO, M.A. & COOLEY, H.J. Applicability of flow models with yield for tomato concentrates. Journal of Food Processing and Engineering, 6, 159-173, 1983.
- REDDY, C.S. & DATTA, A.K. Thermophysical properties of concentrated reconstituted milk during processing. Journal of Food Engineering, 21, 31-40, 1994.
- STADELMAN, W.J. & COTTERILL, O.J. Egg science and technology, 3rd ed., AVI Publish. Co., Westport, 1986.
- SKELLAND, A.H.P. Non-Newtonian flow and heat transfer. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1967.
- TANG, Q., MUNRO, P.A., and MCCARTHY, O.W. Rheology of whey protein concentrate solutions as a function of concentration, temperature, pH and salt concentration. J. Dairy Res. 60, 49-361, 1993.
- TELIS-ROMERO, J., TELIS, V.R.N. & YAMASHITA, F. Frictions factors and rheological properties of orange juice. Journal of Food Engineering, 40, 101-106, 1999.



- TONZAR, A. M.C., KAMEI, C. A. K. KAMEI, M. & MORIYA, S. Projeto de Ovo Líquido Pasteurizado. Monografia, 52 páginas, 1997.
- VÉLEZ-RUIZ, J.F. & BARBOSA-CÁNOVAS, G.V. Rheological properties of concentrated milk as a function of concentration, temperature and storage time. Journal of Food Engineering, 35, 177-190, 1998.
- YANG, T.M.T. & KRIEGER, I.M. Comparison of methods for calculating shear rates in coaxial viscometers. Journal of Rheology, 22(4), 413-421, 1978.

Autómat. a rearranjo case tabelho.

São José do Rio Preto, Janeiro de 2002

CAIO EDUARDO PERES THOMAZ

Autorizo a reprodução deste trabalho.

São José do Rio Preto, Janeiro de 2002.

CAIO EDUARDO PERES THOMAZ



