



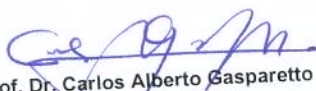
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

*Estudo de uma Metodologia para Monitorar o Processo de
Hidrogenação pela Medida da Viscosidade*

PARECER

*Este exemplar corresponde à
redação final da tese defendida
por Gláucia Ruiz de Paula
aprovada pela Comissão
Julgadora em 11 de setembro de
2001.*

Campinas, 11 de setembro de 2001


Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto
Presidente da Banca

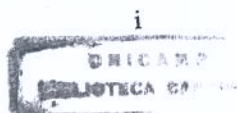
Gláucia Ruiz de Paula
Eng. de Alimentos

Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto
Orientador

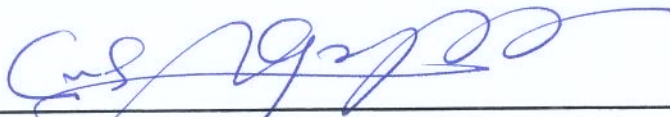
Dissertação Apresentada à Faculdade de Engenharia
de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas
para a obtenção do título de Mestre em Engenharia
de Alimentos.

Campinas – SP
2001

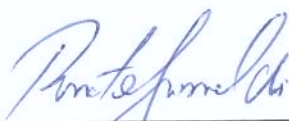
UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE



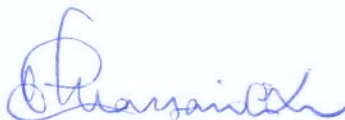
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto
(Orientador)



Prof. Dr. Renato Grimaldi
(Membro)



Prof. Dr. Antônio Marsaioli Junior
(Membro)

Dra Rosiane Lopes da Cunha
(Membro)

Campinas-SP
2001

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

786171002

Nada é grande na
terra, a não ser o
homem,
Nada é grande no
homem, a não ser a
mente e a alma,
A satisfação está no
esforço e não apenas
na realização final.

Gandhi

*Dedico esta tese aos meus pais
Rômulo e Célia, que me ensinaram
a buscar meus sonhos e foram meus
companheiros na dura jornada da
conquista.*

Pai e Mãe, obrigado pelo valioso exemplo de vida, pela dedicação, companheirismo, amor incondicional e força nos momentos mais difíceis.

Bá, agradeço imensamente por sua paciência, compreensão e apoio em todos os momentos.

Junior, seu carinho e amor foram fundamentais para a concretização deste sonho, muito obrigado por tudo.

Lili, sem você certamente este trabalho não seria possível, muito obrigado pela companhia incondicional e deliciosos momentos de descontração.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Carlos Alberto Gasparetto, pela orientação e experiência compartilhada.

Aos Professores Dr. Antônio Marsaiolli Junior, Dr. Renato Grimaldi e Dra. Rosiane Lopes da Cunha, pela correção da tese e importantes sugestões que tanto contribuíram para o aperfeiçoamento deste trabalho.

A Faculdade de Engenharia de Alimentos da Unicamp pela oportunidade de realização deste trabalho.

A Cargill S.A e Maeda Agroindustrial pelo fornecimento do óleo de soja e da gordura vegetal hidrogenada de soja, respectivamente.

Ao Laboratório de Óleos e Gorduras da Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP pelas análises realizadas.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Alimentos pela atenção e colaboração prestados, em especial ao Parreira pelo grande apoio e ao Seu Francisco, Sônia e Dalila pelo carinho e amizade.

A Tia Lale pelas palavras de entusiasmo e incentivo.

Ao Professor Dr. Cláudio Ernani Mendes Silva pela confiança, incentivo, apoio e grande amizade.

A minha amiga e irmã Kelly Zancan pela imensa ajuda, apoio, amizade, dedicação, companheirismo e amor.

A amiga Raquel pelo carinho, amizade, lealdade e confiança.

A minha querida amiga Michele pelo apoio e carinho que tanto contribuíram para a realização deste trabalho.

As amigas Helen, Mami, Junko, Denise, Kelly, Roberta e Adriana pela amizade e pelos deliciosos momentos de descontração.

Ao amigo Anôar pela amizade, paciência, atenção e enorme ajuda em todos os momentos.

Aos amigos Rodenei, Cristiane, Julian, Fernando, Raniere e André pela amizade e convívio repleto de momentos especiais.

Aos amigos do laboratório, Ângela, Elisângela, Éder, Suzi, Patrícia, Daniela, Robson, Sônia e Suely por constituírem um ambiente de trabalho extremamente agradável.

A todos que de alguma forma contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
NOMENCLATURA	xv
RESUMO	xvii
SUMMARY	xviii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo.....	2
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Óleo de Soja.....	3
2.2. Reologia.....	3
2.2.1. Fluidos Newtonianos.....	6
2.2.2. Fluidos Não Newtonianos.....	8
2.3. Reômetros e Viscosímetros.....	12
2.4. Mistura e Agitação.....	14
2.4.1. Tipos de Agitadores.....	16
2.4.2. Agitadores Tipo Turbina.....	18
2.5. Potência Consumida em Reatores de Agitação.....	19
2.6. Hidrogenação e Seletividade.....	22
2.7. Reatores Descontínuos Convencionais.....	28
CAPÍTULO 3 – MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1. Matéria Prima.....	30
3.1.1. Densidade.....	30
3.1.2. Composição de Ácidos Graxos.....	30
3.1.3. Catalisador.....	31
3.2. Reometria.....	31
3.3. Projeto do Equipamento Experimental.....	32
3.3.1. Reator.....	33
3.3.2. Agitador.....	33

3.3.3. Aerador.....	36
3.4. Preparo das Amostras.....	37
3.5. Determinação da Viscosidade.....	38
3.5.1. Determinação da Viscosidade no Reator.....	39
3.6. Processamento dos Dados Experimentais.....	40
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1. Caracterização da Matéria Prima.....	41
4.2. Caracterização Reológica.....	42
4.3. Torque.....	43
4.4. Viscosidade.....	45
4.5. Potência Consumida.....	47
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO.....	57
CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES.....	59
CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
APÊNDICE.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Classificação do comportamento reológico de fluidos.....	5
Figura 2.2.	Perfil de velocidade de um fluido newtoniano presente entre duas placas planas e paralelas.....	6
Figura 2.3.	Comportamento reológico de fluidos não newtonianos dependentes do tempo.....	10
Figura 2.4.	Reograma para vários tipos de fluidos não newtonianos independentes do tempo.....	12
Figura 2.5.	Reator padrão de agitação e mistura.....	16
Figura 2.6.	Tipos de agitadores.....	17
Figura 2.7.	Modelos de agitadores do tipo turbina.....	19
Figura 2.8.	Correlação entre N_{Po} e N_{Re} para agitadores usuais.....	21
Figura 2.9.	Mecanismo da hidrogenação parcial do ácido oleico.....	25
Figura 2.10.	Reator convencional com agitador do tipo turbina de Rushton.....	29
Figura 3.1.	Equipamento experimental.....	33
Figura 3.2.	Reator experimental.....	34
Figura 3.3.	“Spindles” especiais (agitadores).....	34
Figura 3.4.	Dimensões (mm) dos agitadores tipo turbina de Rushton.....	35
Figura 3.5.	Sistema de aeração.....	36
Figura 4.1.	Relação entre taxa de deformação e tensão de cisalhamento para as amostras à 50°C.....	42
Figura 4.2.	Perfil de viscosidade obtido com “spindle” SC4-18 para as amostras à 50°C.....	43
Figura 4.3.	Perfil de viscosidade obtido com “spindle” especial 1.....	46
Figura 4.4.	Perfil de viscosidade obtido com “spindle” especial 2.....	46
Figura 4.5.	Perfil de viscosidade obtido com “spindle” especial 3.....	47
Figura 4.6.	“Spindle” especial 1 sem aeração (fator geral).....	51
Figura 4.7.	“Spindle” especial 1 sem aeração (fator individual).....	51
Figura 4.8.	“Spindle” especial 1 com aeração (fator geral).....	52

Figura 4.9.	“Spindle” especial 1 com aeração (fator individual).....	52
Figura 4.10.	“Spindle” especial 2 sem aeração (fator geral).....	53
Figura 4.11.	“Spindle” especial 2 sem aeração (fator individual).....	53
Figura 4.12.	“Spindle” especial 2 com aeração (fator geral).....	54
Figura 4.13.	“Spindle” especial 2 com aeração (fator individual).....	54
Figura 4.14.	“Spindle” especial 3 sem aeração (fator geral).....	55
Figura 4.15	“Spindle” especial 3 sem aeração (fator individual).....	55
Figura 4.16.	“Spindle” especial 3 com aeração (fator geral).....	56
Figura 4.17.	“Spindle” especial 3 com aeração (fator individual).....	56
Figura A.1.	Perfil de viscosidade obtido com “spindle” 1 em ensaios sem aeração....	77
Figura A.2.	Perfil de viscosidade obtido com “spindle” 1 em ensaios com aeração...	77
Figura A.3.	Perfil de viscosidade obtido com “spindle” 2 em ensaios sem aeração....	78
Figura A.4.	Perfil de viscosidade obtido com “spindle” 2 em ensaios com aeração....	78
Figura A.5.	Perfil de viscosidade obtido com “spindle” 3 em ensaios sem aeração....	79
Figura A.6.	Perfil de viscosidade obtido com “spindle” 3 em ensaios com aeração....	79
Figura A.7.	Cromatograma gordura vegetal hidrogenada Maeda Choc Cover (DC-Soja).....	80

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1.	Composição das amostras.....	37
Tabela 3.2.	Fatores de correção dos “spindles” especiais.....	39
Tabela 4.1.	Composição em ácidos graxos da matéria prima.....	41
Tabela 4.2.	Viscosidade obtida com o “spindle” SC4-18 para as amostras à 50°C.....	43
Tabela 4.3.	Torque obtido com os “spindles” especiais para as amostras à 50°C.....	44
Tabela 4.4.	Viscosidade obtida com os “spindles” especiais para as amostras à 50°C.....	45
Tabela 4.5.	Parâmetros de ajuste das curvas N_{Po} versus N_{Re}	48
Tabela 4.6.	Valores de N_{Re} e N_{Po} para ensaios sem aeração.....	48
Tabela 4.7.	Valores de N_{Re} e N_{Po} para ensaios com aeração.....	49
Tabela 4.8.	Fatores de correção da curva de agitação experimental.....	50
Tabela A.1.	Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 0 sem aeração.....	66
Tabela A.2.	Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 0 com aeração.....	66
Tabela A.3.	Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 1 sem aeração.....	67
Tabela A.4.	Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 1 com aeração.....	67
Tabela A.5.	Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 2 sem aeração.....	68
Tabela A.6.	Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 2 com aeração.....	68
Tabela A.7.	Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 3 sem aeração.....	69
Tabela A.8.	Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 3 com aeração.....	69
Tabela A.9.	Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 4 sem aeração.....	70
Tabela A.10.	Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 4 com aeração.....	70
Tabela A.11.	Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 5 sem aeração.....	71
Tabela A.12.	Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 5 com aeração.....	71
Tabela A.13.	Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 6 sem aeração.....	72
Tabela A.14.	Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 6 com aeração.....	72
Tabela A.15.	Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 7 sem aeração.....	73
Tabela A.16.	Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 7 com aeração.....	73

Tabela A.17. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 8 sem aeração.....	74
Tabela A.18. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 8 com aeração.....	74
Tabela A.19. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 9 sem aeração.....	75
Tabela A.20. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 9 com aeração.....	75
Tabela A.21. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 10 sem aeração.....	76
Tabela A.22. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 10 com aeração.....	76

NOMENCLATURA

A	Área das placas paralelas; [m ²]
B	Número de pás do agitador tipo turbina de Rushton; adimensional
C	Constante da equação 4.2; adimensional
c	Expoente constante da equação 4.2; adimensional
D	Diâmetro do “spindle” especial (agitador); [m]
F	Força; [N]
F_t	Fator de correção da leitura de torque; adimensional
K₁	Constante da velocidade de reação de conversão do ácido linolênico em ácido linoleico; adimensional
K₂	Constante da velocidade de conversão do ácido linoleico à ácido oleico; adimensional
K₃	Constante da velocidade de conversão do ácido oleico em ácido esteárico; adimensional
M_{exp}	Torque obtido experimentalmente com os “spindles” especiais; [N.m]
N	Velocidade de rotação do “spindle”; [rad.s ⁻¹]
N_{Po}	Número de potência; adimensional
N_{Re}	Número de Reynolds; adimensional
R²	Coefficiente de determinação;
V_x	Velocidade da placa paralela na direção x; [m.s ⁻¹]
W	Potência consumida pelo agitador; [watt]

Letras Gregas

$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação; [s ⁻¹]
η	Viscosidade absoluta ou dinâmica; [Pa.s]
η_a	Viscosidade aparente; [Pa.s]
η_{exp}	Viscosidade determinada através dos “spindles” especiais; [Pa.s]
η_m	Viscosidade média obtida com o “spindle” SC4-18; [Pa.s]
ρ	Densidade do fluido; [kg.m ⁻³]
τ	Tensão de cisalhamento; [Pa]

Dissertação de Mestrado: **Estudo de uma Metodologia para Monitorar o Processo de Hidrogenação pela Medida da Viscosidade**

Autora: **Gláucia Ruiz de Paula - Engenheira de Alimentos**

Orientador: **Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto**

Departamento de Engenharia de Alimentos – FEA – UNICAMP – Agosto – 2001.

RESUMO

Neste trabalho experimental foi determinado o comportamento reológico de misturas multifásicas compostas por óleo de soja e gordura hidrogenada de soja, silicato simulando o catalisador e ar em situações similares ao processo de hidrogenação em batelada, utilizando-se um reômetro rotacional tipo Searle, na temperatura de 50°C. Foram construídos três agitadores do tipo turbina de Rushton com 4 pás retas para serem acoplados ao reômetro com a finalidade de medir o torque e determinar as características de Número de Potência (N_{Po}) em função do Número de Reynolds (N_{Re}), visando identificar o progresso da reação de hidrogenação. As curvas de agitação foram ajustadas por um modelo de potência e comparadas com a curva proposta por Rushton. As curvas obtidas estão deslocadas da curva proposta por Rushton de um fator relacionado ao N_{Re} e que foi determinado como sendo 16,7. As medidas reológicas mostram que as misturas apresentam comportamento newtoniano e as viscosidades variam de 22,1 a 31,7mPa.s, apresentando um comportamento crescente à medida que o teor de gordura hidrogenada de soja aumenta, viabilizando portanto a utilização da medida do torque solicitado pelo agitador de um reator de hidrogenação para monitorar o progresso da reação.

Palavras Chave: Óleo de Soja; Hidrogenação; Viscosidade; Agitação; Potência.

M. Sc. Thesis: A Methodological Study for Monitoring the Process of Hydrogenation Through Viscosity Measure.

Author: Gláucia Ruiz de Paula

Supervisor: Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto

Department of Food Engineering – FEA – UNICAMP – August – 2001.

SUMMARY

In this experimental work the rheological behavior of multiphasical mixtures of soybean oil and hydrogenated fat, silicate was used as catalyser and air was determined in similar situations of process of a batch hydrogenation, utilizing a rotational rheometer style Searle, in 50°C. Three shakers style turbine of Rushton with 4 straight shovel were built in order to be coupled to rheometer for measuring torque and determining characteristics of Power Number (N_{Po}) as a function of Reynolds Number (N_{Re}). This process aims at identifying the progress of an hydrogenation reaction. The agitation curves were adjusted as a power model and were compared with the curve developed by Rushton. The obtained curves are dislocated from Rushton curve of a factor of 16,7. This factor is related to N_{Re} . The rheological measures show that mixtures exhibit newtonian behavior and their viscosities range from 22.1 to 31.7 mPa.s, presenting a growing behavior when hydrogenated soybean fat content increases. This behavior is feasible for utilizing the measure of requested torque for shaker of an hydrogenation reactor for monitoring the progress of reaction.

Keywords: Soybean oil; Hydrogenation; Viscosity; Agitation; Potency.

Introdução

O processo de hidrogenação é amplamente utilizado na produção de gorduras com alto ponto de fusão e possui grande importância econômica, permitindo a modificação das características físicas e químicas de óleos e gorduras, conferindo maior flexibilidade e adequação dos produtos obtidos à demanda de mercado existente e sua incorporação a outros produtos elaborados para melhoria de sua qualidade.

Os reatores convencionais para a hidrogenação de óleos comestíveis são delgados, hermeticamente fechados, onde gás hidrogênio é disperso através do óleo no qual partículas sólidas de catalisador estão suspensas e o calor da reação é simultaneamente removido pela troca de calor com a serpentina ou camisa presentes na parede do reator. O sucesso e a eficiência do processo de hidrogenação são diretamente influenciados pela extensão da mistura entre as fases componentes do sistema, consequentemente o tipo de agitador empregado é muito importante.

A potência consumida é um importante parâmetro no projeto de um reator agitado, pois é dependente do tipo de agitador empregado, da velocidade de rotação deste, da geometria do reator, localização e geometria de componentes tais com chicanas, camisas e suportes, e principalmente das características físicas do fluido, como a viscosidade e a densidade.

Como os reatores de hidrogenação trabalham a alta pressão e temperatura, torna-se extremamente difícil controlar a evolução do processo e obter dados sobre as características físicas do produto pois este fica inacessível no decorrer do processo. Usualmente o controle é feito pelo tempo de processo, mas é um controle empírico.

A determinação da viscosidade de fluidos utilizando agitadores acoplados a viscosímetros é relativamente simples, pois através da medida do torque é possível calcular a viscosidade e assim obter informações a respeito do comportamento reológico do produto. O controle do progresso da reação pode ser feito pela medida do torque solicitado ao motor do agitador do reator de hidrogenação.

1.1. Objetivo

Desenvolver um agitador tipo turbina de pás retas para ser acoplado a um reômetro rotacional e medir características reológicas de misturas multifásicas em situações similares àquelas de processo, visando identificar o progresso da reação de hidrogenação através da medida da potência consumida pelo agitador.

Revisão Bibliográfica

2.1 Óleo de Soja

A soja é uma leguminosa domesticada pelos chineses há cerca de cinco mil anos. Sua espécie mais antiga, a soja selvagem, crescia principalmente nas terras baixas e úmidas, junto aos juncos nas proximidades dos lagos e rios da China central. No Brasil, o grão chegou com os primeiros imigrantes japoneses em 1908 e foi introduzida oficialmente no Rio Grande do Sul em 1914. Entretanto, a expansão da soja no Brasil aconteceu apenas nos anos 70, com o interesse crescente da indústria de óleos e a demanda do mercado internacional.

O óleo de soja apresenta alta digestibilidade e não contém colesterol como ocorre com as gorduras de origem animal. Os ácidos graxos insaturados representam 86% do total de lipídeos na soja, e 60% destes estão constituídos por ácidos graxos essenciais, como os ácidos linoléico e linolênico (Lawson, 1985).

Suas principais formas de utilização são na fabricação de gorduras especiais para panificação e frituras, produção de margarinas e como óleo na culinária doméstica.

2.2 Reologia

É a ciência que estuda as propriedades de escoamento dos gases, líquidos e sólidos. O campo da reologia estende-se desde a mecânica de fluidos newtonianos até a elasticidade de Hooke, e a região que compreende este campo é a deformação e o escoamento de todos os materiais pastosos e em suspensão (Bird et al. 1960).

Reologia, de um modo geral, é definida como a ciência que descreve a deformação de um corpo, sob a influência de forças externas. Os corpos, neste contexto, podem ser sólidos, líquidos ou gases. Quando tais forças são aplicadas sobre os fluidos, ou seja, líquidos e gases, eles escoam (Schramm, 1994).

A viscosidade, do ponto de vista reológico, é uma propriedade física muito importante. É definida por Maxwell como a força tangencial requerida para movimentar com velocidade constante uma placa em relação a uma outra, em um sistema de duas placas paralelas separadas por uma distância conhecida, entre as quais está contido um fluido. A viscosidade pode ser definida ainda como a resistência ao escoamento ou como o atrito interno entre moléculas individuais em um dado fluido.

É interessante ressaltar que o conhecimento do comportamento reológico dos diversos produtos alimentícios encontra muitas aplicações na engenharia tais como a modelagem do sistema de transporte por tubulações, a estimativa da pressão de vapor dentro da tubulação e da potência requerida por agitadores, o dimensionamento de bombas e outros equipamentos e a descrição da performance destes equipamentos (Holdsworth, 1971; Boger e Tiu, 1974 e Rao, 1977).

O estudo do comportamento reológico dos diversos produtos alimentícios também encontra aplicações no controle de qualidade e sua correlação com a avaliação sensorial do produto buscando uma maior aceitação do produto pelo consumidor, na compreensão da estrutura de polímeros e na correlação da viscosidade com outras propriedades físicas, cujas determinações sejam mais simples (Holdsworth, 1971; Boger e Tiu, 1974 e Rao, 1986).

A viscosidade de um alimento líquido depende da temperatura e de sua composição, podendo ainda depender da taxa de deformação, da tensão de cisalhamento e da duração deste (Rao, 1977).

O comportamento reológico dos fluidos é classificado em duas categorias, os fluidos newtonianos e os fluidos não newtonianos. As propriedades reológicas dos fluidos Newtonianos são independentes da taxa de deformação e do histórico anterior de cisalhamento sendo dependentes apenas da temperatura e da composição, enquanto os líquidos classificados como não newtonianos são influenciados pela taxa de deformação (Rao, 1977). A Figura 2.1 mostra o esquema de classificação mais utilizado para o comportamento reológico dos fluidos.

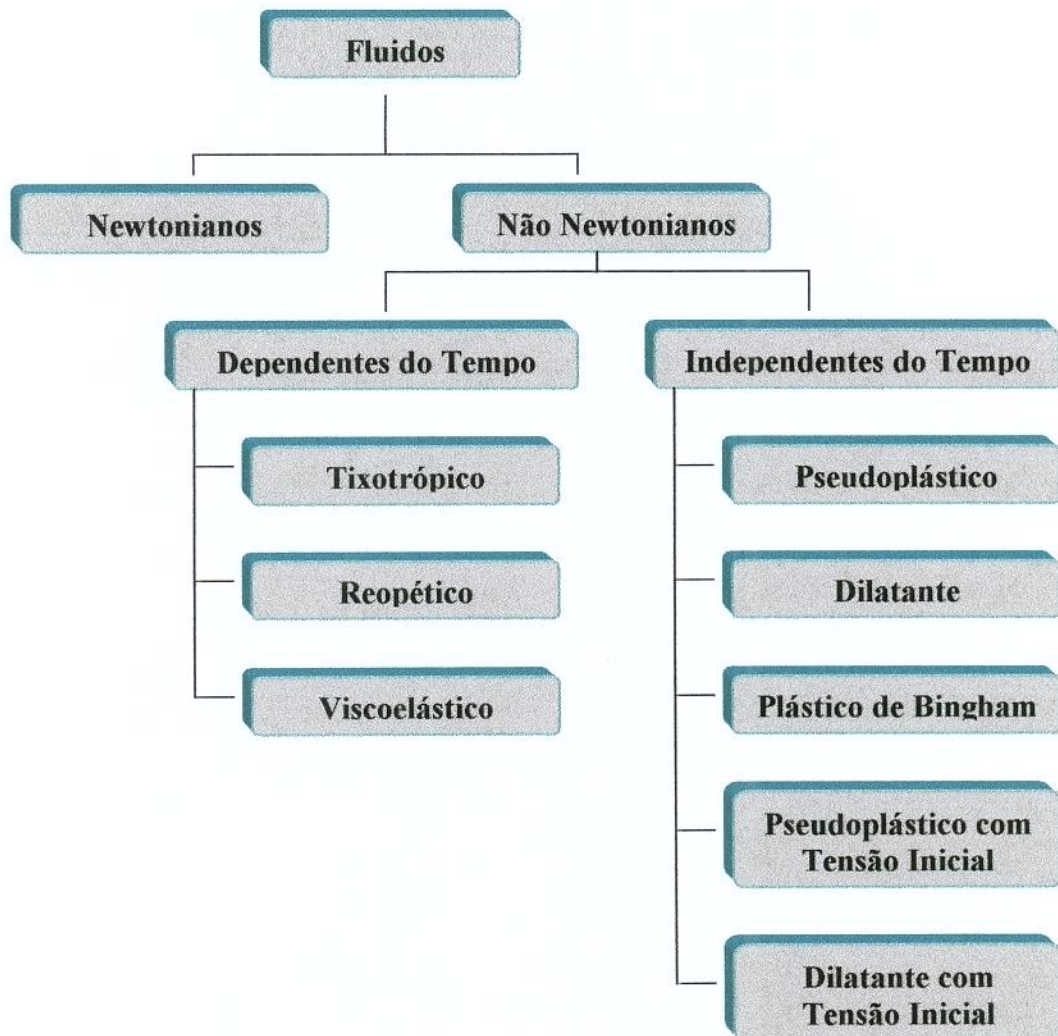


Figura 2.1. Classificação do comportamento reológico de fluidos.

2.2.1 Fluidos Newtonianos

A viscosidade é sinônimo de atrito interno e é a medida da resistência ao escoamento entre camadas de moléculas do fluido. Este conceito de viscosidade foi introduzido por Isaac Newton em 1687, ao apresentar hipóteses associadas ao escoamento simples de fluidos entre duas placas paralelas (Silva, 2000).

Considere uma fina camada de fluido entre duas placas paralelas de área A , distantes entre si de dy , estando uma fixa e outra móvel, submetida à ação de uma força F movendo-se com velocidade constante v , na direção positiva de x conforme a Figura 2.2. A força por unidade de área, necessária para introduzir (F/A) é denominada tensão de cisalhamento e nos fluidos newtonianos em escoamento laminar e regime permanente, a tensão de cisalhamento é proporcional à taxa de deformação, sendo a viscosidade dinâmica do fluido o fator de proporcionalidade (Bird et al., 1960 e Metzner, 1956). As equações 2.1 e 2.2 mostram estas relações .

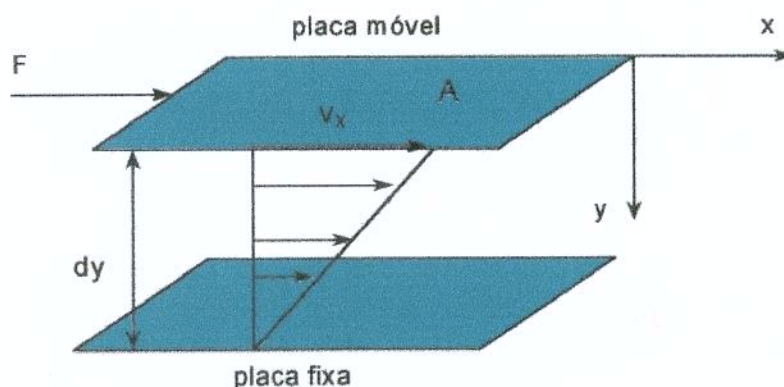


Figura 2.2. Perfil de velocidade de um fluido newtoniano presente entre duas placas planas e paralelas.

$$\frac{F}{A} = \tau_{yx} \propto \frac{dv_x}{dy} \quad [2.1]$$

ou,

$$\tau_{yx} = \eta \frac{dv_x}{dy} = \eta \dot{\gamma} \quad [2.2]$$

onde: τ é a tensão de cisalhamento (Pa)

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

η é a viscosidade absoluta ou dinâmica (Pa.s)

Como citado anteriormente, para os fluidos newtonianos a constante de proporcionalidade η depende apenas da temperatura e da concentração sendo totalmente independente da taxa de deformação.

De acordo com Barnes et al., 1989; um fluido de comportamento newtoniano apresenta as seguintes características quando experimentos são realizados a temperatura e pressão constantes.

- i. A única tensão produzida em uma simples deformação do fluido é a tensão de cisalhamento τ , sendo zero a diferença entre as duas tensões normais.
- ii. A viscosidade não varia com a taxa de deformação.
- iii. A viscosidade é constante no que se refere ao tempo de cisalhamento e a tensão no líquido tende a zero imediatamente após o final do cisalhamento. A viscosidade do fluido se mantém constante independentemente do intervalo de tempo entre as medidas.

Os fluidos newtonianos apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, com coeficiente linear igual a zero. Os gases, líquidos de baixo peso molecular e soluções diluídas de sais e açúcares assim como os óleos, bebidas alcóolicas, refrigerantes, leite, cervejas, vinhos e sucos clarificados, são exemplos de fluidos que apresentam comportamento newtoniano (Rao, 1986; Bobbio & Bobbio, 1984).

2.2.2. Fluidos Não Newtonianos.

Os fluidos são denominados não newtonianos quando seu comportamento reológico não obedece o comportamento descrito pela equação 2.2 e são classificados como dependentes ou independentes do tempo (Rao, 1977).

Quando tratamos de fluidos não newtonianos é importante salientar que a viscosidade a uma determinada taxa de deformação é denominada viscosidade aparente (η_a), que é definida como o quociente entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, conforme demonstra a equação 2.3.

$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [2.3]$$

Nos fluidos não newtonianos independentes do tempo a viscosidade aparente, a uma temperatura constante, é dependente apenas da taxa de deformação ou da tensão de cisalhamento, enquanto que para os fluidos não newtonianos dependentes do tempo a viscosidade é função da magnitude e do tempo de cisalhamento.

A viscosidade aparente nos fluidos não newtonianos dependentes do tempo, varia tanto com a taxa de deformação quanto com a duração de sua aplicação. Os fenômenos de mudança de estrutura com o tempo podem ser reversíveis, parcialmente reversíveis ou irreversíveis (Rao, 1977).

A Figura 2.3 mostra o comportamento dos diferentes tipos de fluidos não Newtonianos dependentes do tempo que são classificados em:

- i. **Tixotrópicos**, quando a tensão de cisalhamento decresce reversivelmente com o tempo, fixadas as taxas de deformação e a temperatura (Skelland, 1967). São exemplos deste tipo de fluido os géis de alginato, leite condensado açucarado e sucos concentrados de maracujá e laranja (Rao, 1977; Holdsworth, 1993).
- ii. **Reopéticos**, quando a tensão de cisalhamento apresenta um acréscimo reversível com o tempo a uma dada temperatura e taxa de deformação. Este tipo de comportamento não foi observado em alimentos sendo mais comum na formação de estruturas como na preparação de creme chantilly e clara em neve (Skelland, 1967).
- iii. **Viscoelásticos**, quando os fluidos apresentam propriedades viscosas e elásticas. Estes fluidos escoam quando submetidos à tensão porém recuperam-se parcialmente das deformações quando cessam as tensões. São exemplos a clara de ovo, creme de leite e misturas para sorvetes (Rao, 1986).

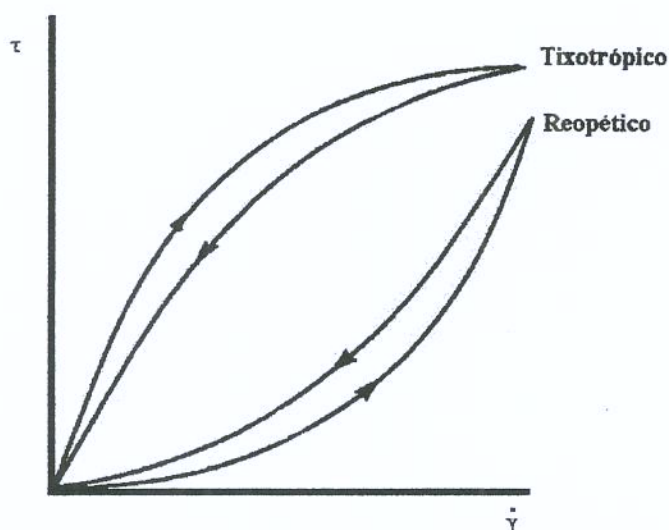


Figura 2.3. Comportamento reológico de fluidos não newtonianos dependentes do tempo.

Grande parte dos fluidos encontrados na engenharia de alimentos é independente do tempo, ou seja, a viscosidade aparente depende apenas da magnitude da taxa de deformação. O reograma deste tipo de fluido não apresenta histerese e a curva resultante é modelada matematicamente utilizando-se relações empíricas (Rao, 1977).

A Figura 2.4 mostra o comportamento dos diferentes tipos de fluidos não newtonianos independentes do tempo que são classificados em:

- i. **Fluidos de Bingham**, apresentam uma tensão de cisalhamento inicial a partir da qual o fluido apresenta um comportamento linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação. Este comportamento é observado em fluidos como maionese, purê de batata, catchup e chocolate (Bobbio & Bobbio, 1984; Macrae et al., 1993; Rao, 1977).

- ii. **Pseudoplásticos**, não apresentam tensão residual, começando a escoar sob a ação de tensões de cisalhamento infinitesimais. É caracterizado pela diminuição da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação. Este fluido é amplamente encontrado em sucos e polpas concentradas de frutas, caldos de fermentação e melaço (Holdsworth, 1971; Rao, 1977).
- iii. **Dilatantes**, são raramente encontrados, e caracterizados pelo aumento da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação. Não apresentam tensão residual e assim como os pseudoplásticos começam a escoar sob a ação de tensões de cisalhamento infinitesimais. São exemplos deste tipo de fluido suspensões de amido e goma arábica (Holdsworth, 1971; Rao, 1977; Macrae et al., 1993).
- iv. **Pseudoplásticos com Tensão Residual**, apresentam uma tensão inicial semelhante ao fluido de Bingham e a partir deste ponto comportam-se de maneira semelhante aos fluidos pseudoplásticos. O suco de laranja concentrado não clarificado é um exemplo deste tipo de fluido (Rao, 1977).
- v. **Dilatantes com Tensão Residual**, apresentam comportamento análogo aos fluidos dilatantes após ultrapassada a tensão inicial semelhante aos fluidos de Bingham. Um exemplo deste fluido são as suspensões de goma de amido com açúcar (Rao, 1977).

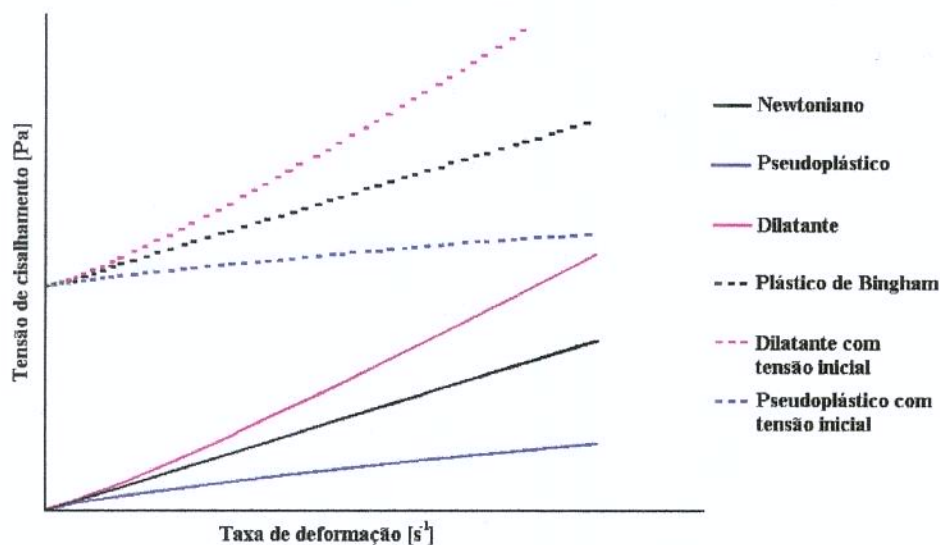


Figura 2.4. Reograma para vários tipos de fluidos não newtonianos independentes do tempo.

2.3. Reômetros e Viscosímetros

Muitos instrumentos diferentes, projetados para medir as propriedades de escoamento tem sido descritos na literatura. Vários autores tem classificado estes equipamentos de diversas maneiras. Scott Blair, 1958 citado por White, 1970 classifica objetivamente os métodos de medida empregados nos equipamentos em:

- i. **Métodos fundamentais**, definem bem propriedades tais como o módulo de elasticidade ou a viscosidade, e sistemas complexos podem ser explicados pelo conhecimento de tais propriedades. Os viscosímetros e reômetros são exemplo de equipamentos baseados em métodos fundamentais.

- ii. **Métodos Empíricos**, medem parâmetros que são definidos pobremente, mas que a experiência mostra estarem relacionados à textura. Podem ser citados como exemplo de equipamentos que utilizam este método os penetrômetros de cone e os consistômetros.
- iii. **Métodos Imitativos**, medem várias propriedades testando sob condições semelhantes às aquelas as quais o produto está sujeito na prática. São muito utilizados comercialmente os equipamentos farinógrafo Brabender e alveógrafo Chopin, ambos baseados no método de medida imitativo.

Atualmente diversos equipamentos são utilizados para medir as propriedades de escoamento por métodos fundamentais; alguns deles são utilizados comercialmente. Muitos dos instrumentos comerciais que são designados para aplicação em materiais que não são alimentícios podem ser usados para estudar alimentos fluidos.

Os reômetros e viscosímetros do tipo capilar, placa e cone e Couette (cilindros concêntricos) têm sido amplamente empregados no estudo de fluidos não Newtonianos. Em particular os reômetros rotacionais do tipo placa e cone e Couette são muito importantes por fornecerem parâmetros reológicos fundamentais ao estudo dos alimentos.

A conveniência de um dado viscosímetro ou reômetro irá depender da natureza do alimentos e dos propósitos para os quais os dados experimentais serão obtidos. Por exemplo, instrumentos operando a um único valor de taxa de deformação são adequados apenas para alimentos que sejam conhecidamente newtonianos, os viscosímetros capilares, e os do tipo “rolling ball” tal como o viscosímetro de Hoesppler são bons exemplos deste tipo de instrumento (Van Wazer, 1963; Rao, 1977).

A determinação da viscosidade de fluidos newtonianos utilizando-se agitadores acoplados a viscosímetros é relativamente simples, contudo alguns cuidados devem ser tomados durante o experimento, entre eles se destacam a correta calibração do equipamento, a manutenção do fluido em regime laminar, a inexistência de falhas na interface líquido sólido e a manutenção da temperatura constante (Rao, 1977).

O viscosímetro Brookfield tem sido empregado amplamente no estudo de alimentos fluidos. Quando utilizado apropriadamente ele pode fornecer valiosas informações a respeito de fluidos newtonianos e não newtonianos, porém é importante ressaltar que este tipo de viscosímetro apresenta apenas valores relativos de viscosidade e que seus “spindles” não são permutáveis, consequentemente, sob uma mesma velocidade de rotação, diferentes “spindles” podem fornecer diferentes taxas de deformação (Rao, 1977).

2.4 Mistura e Agitação

Mistura e agitação são operações muito comuns nos processos industriais e exercem papel fundamental em inúmeros processos tais como extração líquido-líquido, transferência de calor e de massa, cristalização, hidrogenação catalítica, etc.. O sucesso e a eficiência do processo são diretamente influenciados pela extensão da mistura entre as fases componentes do sistema (Coulson, 1997).

Os termos mistura e agitação apesar de freqüentemente serem confundidos como sinônimos na realidade não o são. Mistura é a distribuição casual de duas ou mais fases miscíveis ou imiscíveis, inicialmente separadas, ou de elementos de uma fase simples que possua gradientes de temperatura ou concentração, enquanto que a agitação convencionalmente se refere a movimentação induzida a um material geralmente por um método mecânico, comumente em um padrão circulatório, independentemente de qualquer mistura realizada (Gupta, 1979; McCabe et al., 1993; Geankoplis, 1993; Coulson, 1997).

Um agitador é utilizado para muitos propósitos como suspender partículas sólidas, misturar líquidos imiscíveis, dispersar um gás através de um líquido na forma de minúsculas bolhas e promover a transferência de calor no reator, podendo inclusive atender a vários destes propósitos ao mesmo tempo como ocorre na hidrogenação catalítica de óleos vegetais, onde no reator gás hidrogênio é disperso através do óleo no qual partículas sólidas de catalisador estão suspensas e o calor da reação é simultaneamente removido pela troca de calor com a serpentina ou camisa presentes na parede do reator (Mc Cabe et al., 1993).

O projetista de um agitador tem um grande número de escolhas a fazer como o tipo e a localização do agitador, as proporções do reator, o número e a proporção das chicanas, etc.; cada uma destas decisões afeta a taxa de circulação do líquido, o padrão de velocidade, e a potência consumida pelo agitador. Como ponto inicial do projeto de um agitador padrão, o agitador de turbina é a escolha usualmente utilizada (Mc Cabe et al., 1993).

Um sistema de agitação é geralmente constituído por um reator que pode ou não conter uma camisa externa para o controle de temperatura, um agitador acoplado a um motor de velocidade variável e um medidor de torque. De modo a prevenir qualquer formação de vórtex, chicanas podem ser fixadas na parede interna do reator. A Figura 2.5 ilustra um exemplo de um sistema comum de mistura e agitação.

Usualmente são utilizadas quatro chicanas, o número de pás no agitador pode variar de 4 à 16 sendo utilizadas usualmente 6 ou 8 pás. Em reatores de agitação e mistura padrões as seguintes proporções entre as medidas geométricas são respeitadas visando uma otimização da potência consumida pelo agitador (Mc Cabe et al., 1993; Gupta, 1979; Brauer, 1979).

$T/D = 3$	$s/D = 0,125$
$C/D = 1$	$J/D = 0,30$
$Z/D = 3$	$r/D = 0,25$
$w'/D = 0,2$	$Z/T = 1$

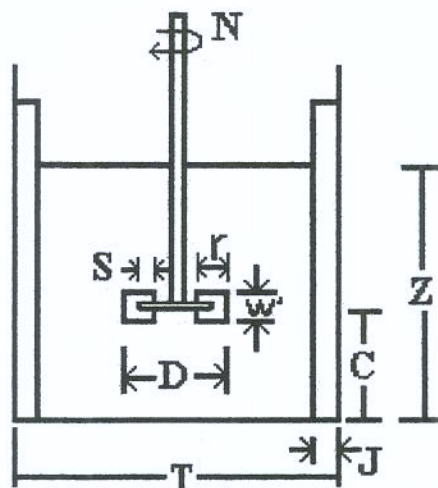


Figura 2.5. Reator padrão de agitação e mistura.

2.4.1 Tipos de Agitadores

Conforme o tipo de corrente que geram, os agitadores podem ser divididos em dois tipos; aqueles que geram movimentos paralelos ao eixo do agitador, conhecidos como agitadores de fluxo axial e os agitadores de fluxo radial ou seja, geram correntes tangenciais ou radiais ao eixo do agitador, a Figura 2.6 mostra o esquema de alguns tipos de agitadores.

Os três principais tipos de agitadores são os de turbina, pás retas e os propulsores; cada tipo inclui muitas variações e subtipos. Existem ainda os agitadores do tipo âncora e fita helicoidal, mas sua aplicação não é muito freqüente na indústria química e farmacêutica sendo utilizado principalmente em processos na indústria alimentícia (Perry, 1973; Lozano, 1982; Mc Cabe et al., 1993).

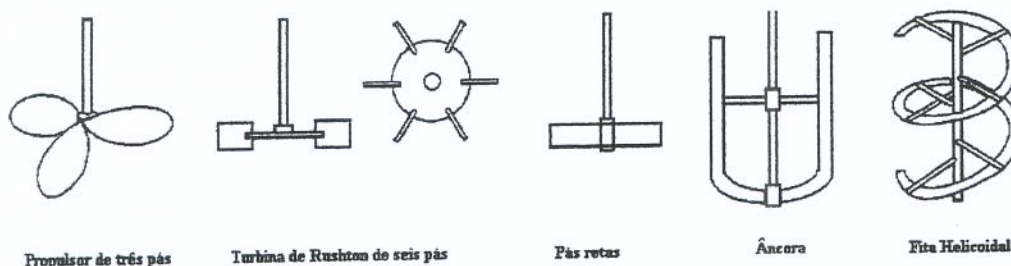


Figura 2.6. Tipos de Agitadores

Os agitadores do tipo pás retas são muito úteis na mistura de líquidos viscosos onde depósitos nas paredes do reator possam ocorrer, porém não são adequados para suspensões sólidas pois apresentam um fluxo radial adequado mas um fluxo axial muito pequeno. São freqüentemente utilizados para baixas velocidades geralmente compreendidas entre 20 e 200 rpm. Os agitadores com duas ou quatro pás são os mais empregados geralmente nos processos envolvendo tintas, pastas de amido, adesivos e cosméticos (Gupta, 1979; Geankoplis, 1993; Mc Cabe et al., 1993).

Existem atualmente diversos tipos de agitadores do tipo propulsores que são empregados normalmente na agitação de líquidos de baixa viscosidade e em altas velocidades que variam de 400 a 1750 rpm. Este tipo de agitador produz fluxo do tipo axial e pode ser usado para suspensões sólidas em líquidos e na mistura de líquidos imiscíveis (Gupta, 1982; Mc Cabe, 1993).

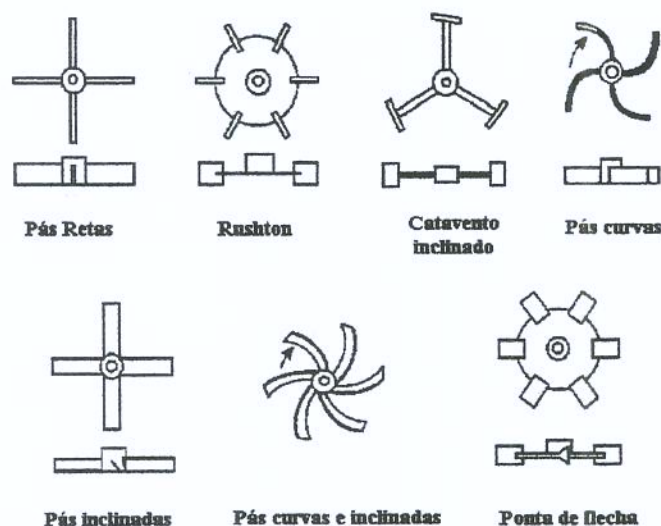


Figura 2.7. Modelos de agitadores do tipo turbina.

2.5 Potência Consumida em Reatores de Agitação

Em projetos de reatores de agitação existem dois tipos de problemas a serem considerados, como projetar e selecionar o equipamento de agitação para um caso específico e avaliar se um dado agitador é conveniente para esta aplicação em particular. Em ambos os casos, aspectos do processo de agitação como os critérios de similaridade e “scale up”, o mecanismo de agitação, a potência consumida, a taxa e o tempo de agitação e os padrões de fluxo devem ser conhecidos (Coulson, 1997).

Do ponto de vista prático, a potência consumida é sem dúvida o mais importante parâmetro no projeto de um reator de agitação. A potência consumida em um processo de agitação não é dependente apenas do tipo de agitador empregado e da velocidade de rotação deste, mas também da geometria do reator, localização e geometria de componentes tais como chicanas, camisas e suportes, e principalmente das características físicas do fluido, como a viscosidade e a densidade (Rushton et al., 1950; Coulson, 1993).

Para estimar a potência requerida para rotacionar um dado agitador a uma velocidade específica, correlações empíricas de potência com outras variáveis do sistema são necessárias. A curva de transferência de energia fornece a relação entre o coeficiente de transferência de energia e os parâmetros físicos relevantes do fluido, sendo a transferência de energia expressa pelo número de potência. A equação 2.4 fornece a expressão para o cálculo deste adimensional.

$$N_{Po} = \frac{W}{N^3 D^5 \rho} \quad [2.4]$$

Onde, W é a energia transferida pelo agitador para o fluido, N é o número de revoluções do agitador por unidade de tempo, D é o diâmetro do agitador e ρ é a densidade do fluido. Na maioria dos casos o número de potência é apresentado como uma função do número de Reynolds, representado pela equação 2.5.

$$N_{Re} = \frac{ND^2 \rho}{\eta} \quad [2.5]$$

Onde η é a viscosidade de um fluido newtoniano. Não existem métodos disponíveis que permitam o cálculo teórico do número de potência assim, as relações funcionais entre o número de potência e o número de Reynolds tem sido determinadas experimentalmente. A Figura 2.8 mostra as linhas de correlações típicas para os agitadores mais freqüentemente utilizados operando em fluidos newtonianos contidos em reatores cilíndricos com chicanas (Perry, 1973; Brauer, 1979; Coulson, 1997).

Rushton e seus colaboradores (1950); realizaram investigações preliminares sobre o efeito da variação da geometria do tanque e a correlação do número de potência com o número de Reynolds. Eles demonstraram que o número de potência depende do número de pás no agitador de turbina como descrito na equação 2.6.

$$N_{Po} \propto \left(\frac{B}{6}\right)^{0,8} \quad \text{se } B < 6 \quad \text{e} \quad N_{Po} \propto \left(\frac{B}{6}\right)^{0,7} \quad \text{se } B > 6 \quad [2.6]$$

Onde B é o número de pás presentes no agitador tipo turbina.

Em tanques agitados onde existe dispersão de ar observou-se experimentalmente que a transferência de energia é reduzida em 40% para agitadores do tipo turbina (Brauer, 1979).

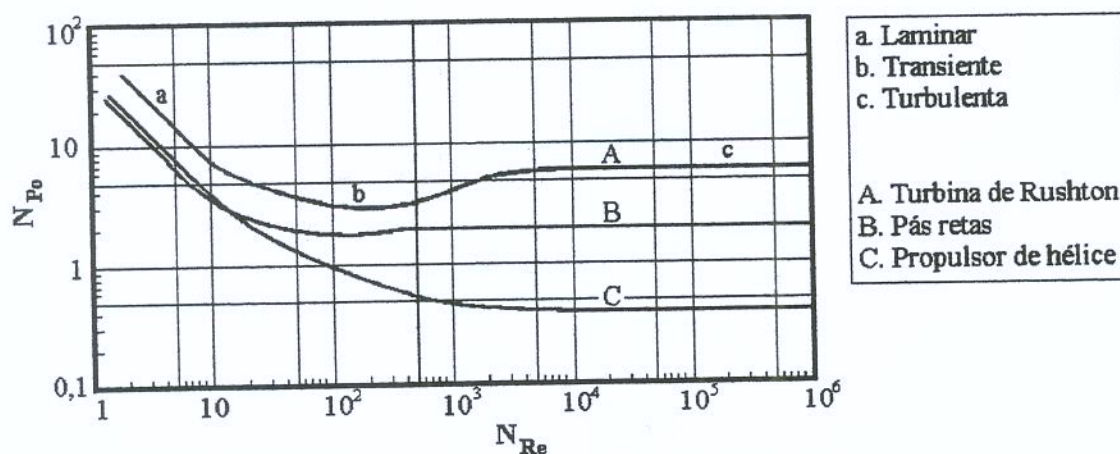


Figura 2.8. Correlações entre N_{Po} e N_{Re} para agitadores usuais.

2.6 Hidrogenação e Seletividade:

A hidrogenação é o processo de adição de hidrogênio a uma dupla ligação carbono-carbono insaturada na presença de um catalisador (Gunstone, 1983). O principal efeito da hidrogenação de óleos e gorduras é a adição de hidrogênios aos ácidos graxos insaturados com a ajuda de um metal finamente dividido tal como o níquel que atua como catalisador. Assim as duplas ligações são saturadas e por este motivo o ponto de fusão do material que está sendo formado aumenta progressivamente, ou seja, o óleo é transformado em gordura (Paterson, 1973).

A reação de hidrogenação pode ser escrita como:



Durante o processo de hidrogenação, o hidrogênio gasoso é dissolvido no óleo e ambos entram em contato com o catalisador através de um processo mecânico. A pressão, temperatura e agitação no reator devem ser tais que permitam a máxima solubilidade do hidrogênio no óleo e a maior transferência de massa possível.

A solubilidade do hidrogênio no óleo aumenta linearmente com a temperatura; como um aumento desta favorece a cinética da reação, a velocidade da reação também aumenta; assim com o rápido consumo do gás o catalisador não fica totalmente coberto pelo hidrogênio o que acarreta uma maior formação de isômeros trans e uma menor produção de ácidos graxos totalmente saturados, pois o processo se torna mais seletivo (Allen, 1986).

A pressões elevadas, a quantidade de hidrogênio dissolvido no óleo é disponível para a reação é mais alta, conseqüentemente o catalisador estará mais coberto com hidrogênio e menor será a influência do hidrogênio vizinho à dupla ligação no processo, assim, a formação de isômeros posicionais trans será menor e a formação de ácidos graxos saturados será maior (Allen, 1986).

Apesar de aparentemente simples, o processo de hidrogenação é na realidade bastante complexo, sua taxa de reação depende principalmente da temperatura de trabalho, da pressão de hidrogênio e da taxa de suprimento deste, do tipo e concentração do catalisador, do projeto do reator de hidrogenação e da qualidade e natureza do óleo a ser hidrogenado (Grothues, 1985).

Albright (1987) apresentou uma descrição detalhada das etapas físicas e químicas necessárias para a hidrogenação e isomerização dos grupos insaturados. Cabrera (1996) relacionou algumas etapas principais que estão descritas a seguir:

- O hidrogênio é inicialmente transferido da fase gasosa para a fase líquido-oleosa, onde parte deste é dissolvido e transferido para a superfície externa do catalisador.
- Os catalisadores estão depositados em um suporte essencialmente não ativo e por isso, os reagentes devem difundir-se nos poros para entrar em contato com a superfície ativa do catalisador. A forma e o tamanho dos poros influenciam fortemente a transferência dos reagentes e afetam indiretamente as subseqüentes reações de hidrogenação e isomerização. Poros muito estreitos produzem menor isomerização geométrica, quando comparados com poros mais largos em forma de fenda. A facilidade de difusão dos reagentes nos poros é diretamente afetada pelo peso molecular, tamanho e forma do

composto que está reagindo, assim, ésteres simples se difundem mais rapidamente nos poros do que os triglicerídeos, que são moléculas maiores.

- O hidrogênio e o grupo insaturado do ácido graxo são adsorvidos na superfície catalítica. A molécula de hidrogênio deve eventualmente, dissociar-se em átomos e formar com o níquel os respectivos hidretos (NiH e NiH_2). O espaçamento dos átomos do catalisador na superfície catalítica é essencialmente igual à distância entre os dois átomos de carbono do grupo insaturado. Cada grupo insaturado do triglicerídeo pode estar se transferindo entre a carga do óleo e a superfície do catalisador. Os grupos insaturados podem ser adsorvidos na superfície catalítica e têm possibilidade de reagir com o átomo de hidrogênio formando assim um complexo instável que é a dupla ligação parcialmente hidrogenada. Alguns destes complexos reagem com outro átomo de hidrogênio para completar a saturação da dupla ligação. Caso o complexo não reaja com outro átomo de hidrogênio, este é removido da molécula adsorvida e a nova ligação insaturada é dessorvida.
- As ligações saturadas e insaturadas são dessorvidas da superfície catalítica e difundidas dentro da carga do óleo. Assim, são obtidos diversos tipos de ligações, algumas saturadas e outras insaturadas e/ou isomerizadas que podem se deslocar para novas posições ou novas formas geométricas. Os isômeros geométricos são quase sempre produzidos pelo NiH_2 , enquanto que os isômeros posicionais são produzidos pelo NiH .

A Figura 2.9 mostra um esquema do mecanismo da reação de hidrogenação proposto por Allen (1987) citado por Cabrera (1996):

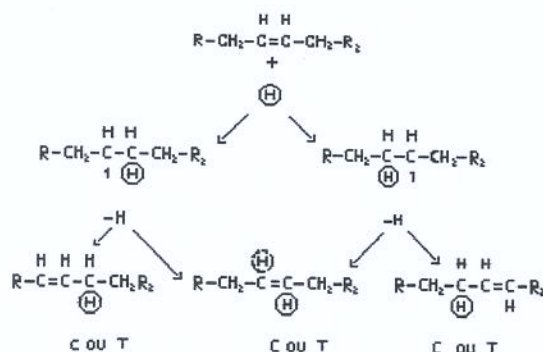


Figura 2.9. Mecanismo da hidrogenação parcial do ácido oléico

A hidrogenação total com uma completa saturação de todas as duplas ligações é normalmente de interesse limitado para óleos comestíveis. Comumente a produção de gorduras comestíveis é realizada por hidrogenação parcial. A seletividade deste processo é de crucial importância, sendo os principais tipos a seletividade S_R e a seletividade S_i (Grothues, 1985).

A seletividade S_R é denominada seletividade linoléica, representando a taxa de conversão do ácido graxo $18:2 \rightarrow 18:1$ comparada com a taxa de conversão de $18:1 \rightarrow 18:0$, ou seja, é a comparação da velocidade na qual o ácido oléico é produzido a partir do ácido linoléico em relação à velocidade em que o ácido oléico é transformado em ácido esteárico.

Baixos valores de S_R indicam que o ácido esteárico é formado desde o início da reação, enquanto que altos valores de S_R indicam que a formação deste ácido é inibida até que todo o ácido linoléico tenha sido transformado em ácido oléico (Coenen, 1976).

A seletividade S_i é denominada trans seletividade, descrevendo a tendência de formação de isômeros trans e é definida como a porcentagem de isômeros trans formados por unidade de índice de iodo reduzida.

A seletividade de um catalisador ou de uma reação de hidrogenação pode ser explicada considerando-se a sequência das reações que ocorrem durante a hidrogenação, assim o termo seletividade pode ser definido como uma preferência maior pela hidrogenação de um tipo de substância insaturada a outra, o que na prática seria a habilidade para manter esta preferência até que a concentração da referida substância insaturada diminua (Allen, 1978).

Cabrera (1996), apresenta o seguinte modelo simplificado:



Onde temos que:

- K_1 é a constante da velocidade de reação de hidrogenação do ácido linolênico para transformar-se em ácido linoléico.
- K_2 é a constante da velocidade de conversão do ácido linoléico à ácido oléico.
- K_3 é a constante da velocidade de conversão do ácido oléico em ácido esteárico.

Neste modelo são ignorados todos os isômeros formados durante a hidrogenação, como por exemplo a formação a partir do ácido linolênico, de dienos com as duplas ligações isoladas que são analisados como dienos, mas hidrogenados como monoenos (Cabrera, 1996).

Durante a hidrogenação de óleos, o progresso da reação é influenciado pelas condições de processo bem como pelas características do catalisador utilizado (Allen, 1978). Um catalisador pode ser descrito em termos de sua atividade que se refere à quantidade de catalisador necessária para hidrogenar uma batelada de óleo em um tempo razoável, e em termos de sua seletividade que se refere à relação das constantes de reação de duas das espécies de ácidos graxos participantes (El-Shattory et al., 1980).

Segundo Beckmann (1983), um catalisador ideal deve exibir uma alta seletividade e atividade, enquanto também é essencial que ele possa ser filtrado muito rapidamente, entretanto os dois objetivos são incompatíveis. Um catalisador muito seletivo deve ter poros largos e rasos o que insinua partículas pequenas que também favorecem uma alta atividade e uma alta resistência a venenos (impurezas contidas na matéria prima) porém, partículas pequenas conduzem a dificuldades na filtração. Para facilitar o transporte dos triglicerídeos pelos poros, as dimensões do poro devem ser da ordem de pelo menos 10nm. A preparação de tal estrutura em um sólido poroso exige controles extremamente rigorosos durante a produção, mas a princípio esta estrutura ideal pode ser preparada.

O processo de hidrogenação é de grande importância econômica, pois permite a modificação prática das características físicas e químicas de óleos e gorduras, adequando os produtos obtidos à demanda de mercado existente e ou permitindo sua incorporação a outros produtos elaborados para melhoria de sua qualidade” (Rauen, 1994).

A hidrogenação é amplamente utilizada pois melhora a cor, produz gorduras com um alto ponto de fusão, promove uma melhor flexibilidade na formulação de produtos, converte óleos líquidos em gorduras com pontos de fusão precisos, melhora a estabilidade do sabor e a estabilidade oxidativa (Lips, 1993).

2.7 Reatores Descontínuos Convencionais

Dois tipos de processo são utilizados na hidrogenação de óleos, os processos contínuos e os descontínuos (Grothues, 1985). O processo descontínuo é também conhecido como batelada, sendo industrialmente mais utilizado que o processo contínuo, pois permite uma grande flexibilidade no que se refere a troca de produtos, seletividade da reação e qualidade do produto final (Pinedo, 1995).

As principais considerações que devem ser feitas ao se projetar um reator descontínuo são um bom contato entre o óleo e o gás, a energia necessária para a agitação, o compressor para o hidrogênio, a bomba de recirculação do óleo e um bom controle da temperatura e pressão. O fator que sempre determina a taxa de hidrogenação é a transferência de hidrogênio da fase gasosa para a fase líquida. Como resultado disto, o reator deve ser capaz de sustentar um alto nível de transporte de massa (Edvardson & Irandoust, 1994).

No processo descontínuo de hidrogenação de óleos vegetais dois tipos de reatores são mais utilizados industrialmente, os reatores convencionais com agitadores mecânicos e os reatores que utilizam o sistema de recirculação do líquido reagente denominados reatores tipo Loop.

Os reatores descontínuos convencionais são equipamentos bastante simples, consistindo de um tanque, uma bomba para injetar a mistura semi-sólida de óleo e catalisador, um tubo dispersor perfurado para adicionar o hidrogênio no tanque na forma de pequenas bolhas, e um agitador (Allen, 1982). Nestes reatores a relação $\frac{H}{D}$ é sempre muito maior que um, sendo o diâmetro (D) geralmente da ordem de 500mm.

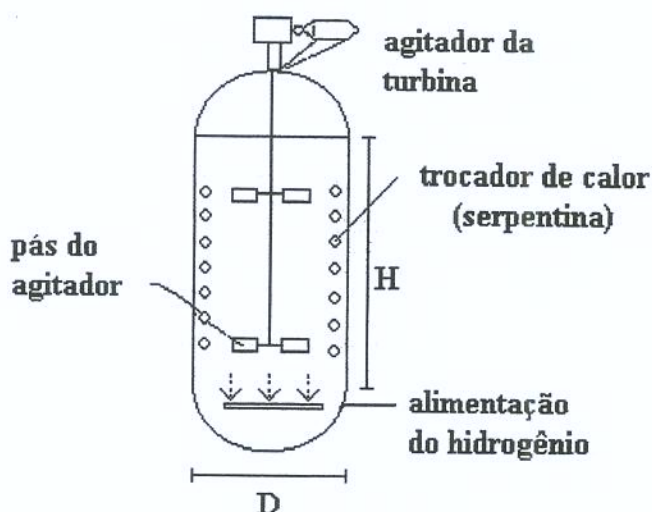


Figura 2.10. Reator convencional com agitador do tipo turbina de Rushton.

Nos reatores convencionais a função principal do sistema de agitação é solubilizar e dispersar o hidrogênio gasoso no óleo e induzir à maior área de contato possível entre óleo, hidrogênio e catalisador. Nestes reatores a tendência das bolhas de hidrogênio injetadas na parte inferior é subir até a parte superior e coalescer, desse modo é necessário um agitador eficiente que seja capaz de reduzir estas bolhas de gás a micro bolhas melhorando assim a solubilidade e dispersão do hidrogênio propiciando uma maior transferência de massa na superfície do catalisador onde ocorre a reação (Pinedo, 1985).

Material e Métodos

3.1 Matéria Prima

Foram utilizados neste trabalho óleo de soja refinado comercial fornecido por Cargill Agrícola S.A., acondicionado em recipientes plásticos de 900ml, e gordura vegetal hidrogenada Maeda Choc Cover (DC-Soja) fornecida por Maeda S.A. Agroindustrial, acondicionada em saco plástico de polietileno. As matérias primas utilizadas no experimento foram retiradas do mesmo lote, eliminando assim possíveis erros relacionados às diferenças de composição das mesmas. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Medidas Físicas da Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP.

3.1.1. Densidade

A densidade foi determinada pelo método 2.101 da International Union of Pure and Applied Chemistry (1987). As análises foram realizadas em triplicata visando evitar possíveis erros.

3.1.2 Composição de Ácidos Graxos

A composição de ácidos graxos do óleo de soja refinado foi determinada por cromatografia gasosa, pelo método CE 1-62 da AOCS (1977), com resultados expressos em metil éster de ácidos graxos, conforme informado pelo fornecedor.

A composição de ácidos graxos da gordura vegetal hidrogenada de soja foi determinada por cromatografia gasosa, pelo método Ce 1f-96 (1997) da AOCS sob as seguintes condições: Análise: Cromatógrafo Perkin Elmer 8420; Operação do

cromatógrafo: Coluna capilar de sílica fundida CP-Sil-88, 50m x 0,25mm. Temperatura da coluna - 160°C – 10min; 160-200°C – 4°C/min; temperatura do detector: 300°C; temperatura do injetor: 270°C; gás de arraste (He) – 0,98 mL/min; Split -1:55. A metilação dos ácidos graxos foi realizada pelo método Ce 2-66 (1997) da AOCS. A análise foi realizada no Laboratório de Óleos e Gorduras da FEA-UNICAMP.

3.1.3. Catalisador

O principal catalisador utilizado industrialmente na hidrogenação de óleos vegetais é composto por óxido de níquel finamente disperso em suportes de silicato, agrupados em pastilhas de triacilglicerol hidrogenado com ponto de fusão entre 100°C e 140°C (Cabrera, 1996; Lips, 1993).

Devido a impossibilidade de solubilização das pastilhas na matéria prima optou-se pelo uso de areia fina (sílica) como simulador físico do catalisador. Esta foi calcinada em mufla Quimis modelo 318D21, à 250°C durante 12 horas com a finalidade de eliminar resíduos orgânicos. Em seguida a areia foi passada por duas peneiras de controle granulométrico Granutest. A peneira superior de malha tyler 250 reteve as partículas maiores que 0,062 mm e a inferior de malha tyler 325 reteve as partículas maiores que 0,044 mm, dessa maneira as partículas que foram coletadas no suporte, menores que 0,044 mm e de tamanho semelhante ao do catalisador utilizado em reatores de hidrogenação de óleos vegetais, foram utilizadas para simular o mesmo no experimento. A concentração de catalisador utilizada em todas as amostras foi de 0,05%.

3.2 Reometria

As medidas reológicas foram realizadas em um reômetro rotacional, marca Brookfield tipo Roto Digital, modelo LVDV – II+, série RT52021, de cilindros concêntricos, acoplado ao “software” coletor de dados e registrador gráfico Wingather e ao

“software” programador Dvloader. A principal vantagem em se utilizar este tipo de reômetro é o fornecimento de uma medida continua da relação taxa de deformação e tensão de cisalhamento.

O viscosímetro Brookfield é composto por um motor síncrono acoplado a um dispositivo no qual um elemento (“spindle”) é preso e gira imerso no fluido teste. O fluido pode estar contido em um bequer de até 600ml ou em um cilindro coaxial com camisa termostatizada adaptável ao viscosímetro, de volume variável entre 2,0 e 16,0ml e que permite a leitura de viscosidades compreendidas entre 5,0 e 10.000.000 mPa.s, e taxas de deformação entre 0,066 e 93,0 s⁻¹. Este cilindro permite ainda a conexão com um banho circulatório para o controle da temperatura da amostra suportando temperaturas de até 100°C.

Este tipo de viscosímetro possui “spindles” de diversas geometrias e para os mais variados tipos de aplicação, existindo entretanto situações nas quais “spindles” de geometria específica se fazem necessários para obter um resultado otimizado da leitura, assim o equipamento permite informar dados de “spindles” especiais para tais leituras. Neste trabalho foram usados o “spindle” cilíndrico SC4-18 e os “spindles” especialmente projetados com geometria de agitadores do tipo turbina de Rushton.

A temperatura de medição foi mantida constante e controlada por banho ultratermostático Nova Técnica modelo NT281, com faixa operacional de -20 até +150°C ($\pm 0,01$ °C). As medidas foram realizadas à temperatura de 50°C.

3.3 Projeto do Equipamento Experimental

O equipamento experimental é constituído por um reômetro rotacional no qual é acoplado um “spindle” especial (agitador), que está imerso no líquido teste contido em um

reator sendo este ligado a um sistema de aeração e a um banho ultratermostático. A Figura 3.1 permite a visualização geral do equipamento.



Figura 3.1. Equipamento Experimental.

3.3.1 Reator

O reator consiste de um béquer de vidro encamisado com 4 chicanas tubulares sendo uma de latão e três de silicone todas com diâmetro externo 3mm, coladas na parede do mesmo diametralmente opostas duas a duas. A chicana de latão foi presa ao aerador com a finalidade de levar o ar até este. O béquer possui 83,3 mm de diâmetro interno, 105,2mm de diâmetro externo, 111,5mm de altura interna, 152,0 mm de altura externa e volume total 600 ml. A Figura 3.2 fornece uma vista superior do reator.

3.3.2 Agitador

“Spindles” de geometria similar a agitadores do tipo turbina de Rushton com quatro p s foram projetados visando simular a medida da viscosidade dentro de reatores agitados e aerados. As medidas destes agitadores foram baseadas na configuração padrão descrita na

literatura. Três agitadores foram construídos em latão, no Centro de Tecnologia–DIE–Mecânica Fina da UNICAMP. A Figura 3.4 traz um esquema geral do projeto e as dimensões dos agitadores e a Figura 3.3 permite visualizar os três “spindles” especiais utilizados neste trabalho.

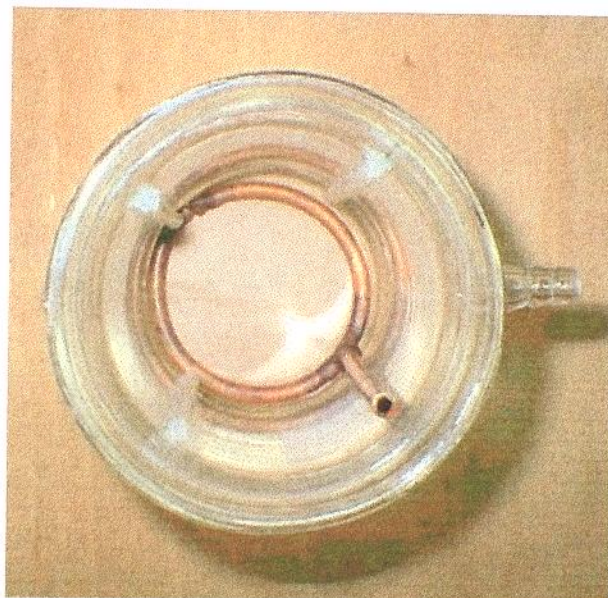


Figura 3.2. Reator experimental.

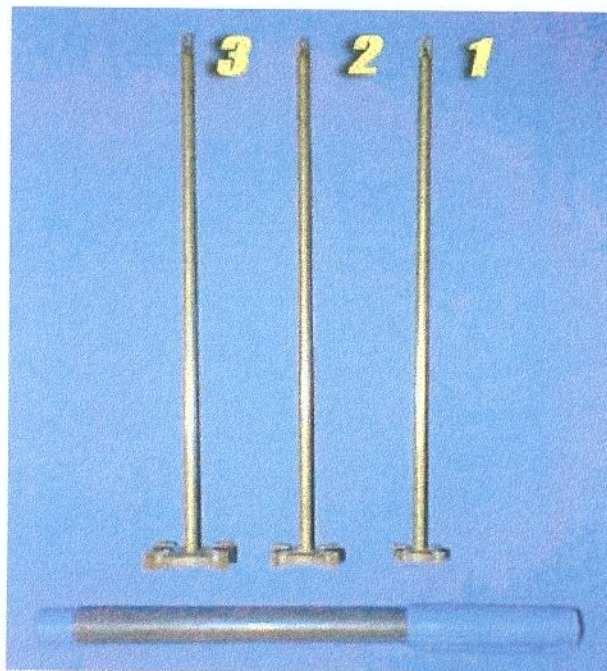
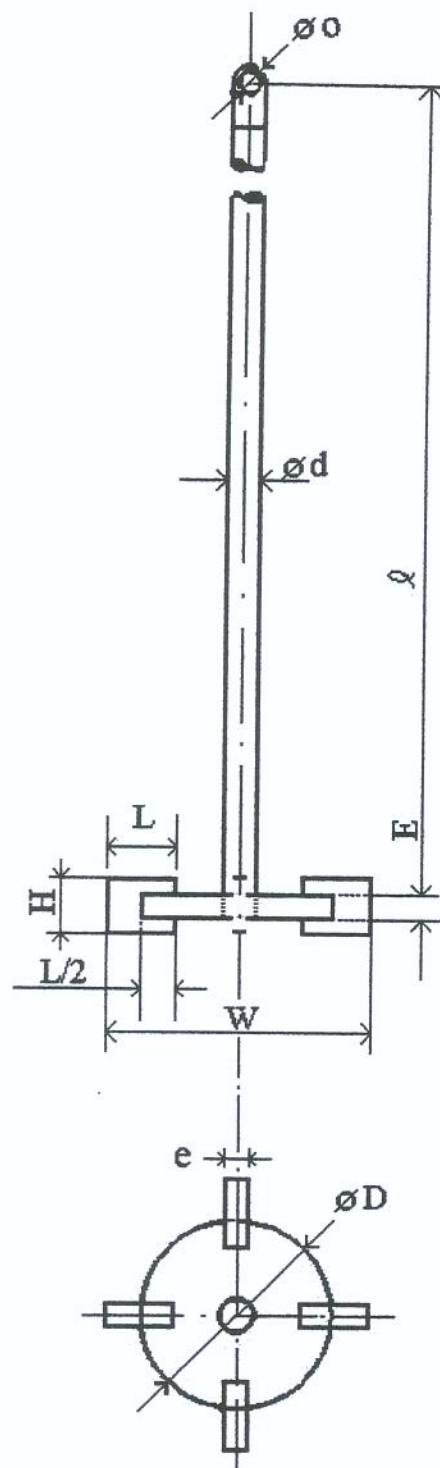


Figura 3.3. “Spindles” especiais (agitadores).



Agitador	1	2	3
D	12	16	19,9
d	3	3	3
E	2	2	2
e	1	1	1
H	3,2	4,3	5,3
L	4,0	5,3	6,6
ℓ	150	150	150
O	2	2	2
W	16	21,3	26,5

Figura 3.4. Dimensões (mm) dos agitadores tipo turbina de Rushton.

3.3.3 Aerador

O aerador foi construído com um tubo de cobre de diâmetro externo 4,6mm na forma de anel de diâmetro externo 75mm e perfurações de 0,05mm espaçadas simetricamente de 10mm, e acoplado ao rotâmetro com a finalidade de levar o ar até o reator e produzir pequenas bolhas no líquido. A figura 3.5 mostra o sistema de aeração utilizado no experimento.

O ar, utilizado na aeração do reator como simulador do hidrogênio, foi obtido através da rede local de ar do laboratório de medidas físicas da FEA-UNICAMP. Sua umidade foi retirada forçando a passagem do mesmo por um Kitassato de 500ml contendo sílica gel e sua vazão controlada pelo rotâmetro Fast & Tite Patented 3-8PP. A vazão utilizada no experimento foi mantida constante em 1,5 litros/min.



Figura 3.5. Sistema de aeração.

3.4. Preparo das Amostras

A formulação utilizada em cada amostra foi baseada no intuito de simular a evolução do processo de hidrogenação de óleos vegetais em reatores descontínuos convencionais. Assim, foram preparadas 11 misturas entre o óleo de soja e a gordura vegetal hidrogenada de soja em quantidades inversamente proporcionais de cada componente. A Tabela 3.1 mostra a codificação e as quantidades de cada componente presentes em cada amostra.

Tabela 3.1. Composição das amostras.

Amostra	Óleo de Soja (g)	Gordura Vegetal Hidrogenada (g)	Catalisador (g)
0	500	0	0,25
1	450	50	0,25
2	400	100	0,25
3	350	150	0,25
4	300	200	0,25
5	250	250	0,25
6	200	300	0,25
7	150	350	0,25
8	100	400	0,25
9	50	450	0,25
10	0	500	0,25

No preparo individual de cada amostra foi realizada inicialmente a liquefação da gordura vegetal hidrogenada de soja em um bequer colocado sobre chapa aquecedora marca Fisatom modelo 752A. As matérias primas foram pesadas em balança analítica Marte modelo AS2000 com precisão de 2 casas decimais, em um bequer de vidro no qual colocou-se com o auxílio de pipetas, inicialmente a gordura vegetal hidrogenada de soja e em seguida o óleo de soja refinado.

Para que a mistura atingisse temperatura próxima a 50°C o bequer foi colocado sobre chapa aquecedora marca Fisatom modelo 752A; um agitador magnético foi adicionado ao bequer e a agitação foi mantida por 30 minutos para assegurar a completa

mistura entre os dois componentes da amostra. Imediatamente após foram iniciadas as leituras no viscosímetro.

3.5 Determinação da Viscosidade

Testes preliminares foram realizados com a finalidade de obter a faixa de velocidade de leitura da viscosidade das amostras. Foram realizadas leituras das amostras 0 e 10, utilizando-se o “spindle” SC4-18, à temperatura de 50°C e em velocidades compreendidas entre 10 e 120 rpm., verificando-se assim que as velocidades de leitura significativas estavam entre 15 e 90 rpm. Conhecendo-se a faixa de leitura significativa realizou-se então um estudo da viscosidade de todas as amostras individualmente. Todas as leituras realizadas neste trabalho foram feitas em triplicata e os dados aqui reportados se referem à média dos valores obtidos nas mesmas.

Em seguida foram efetuadas leituras de torque da amostra 0 no reator sem aeração utilizando-se os “spindles” especiais 1, 2 e 3, com a finalidade de encontrarmos um fator de correção das leituras de viscosidade feitas por estes “spindles”. Para o cálculo deste fator utilizou-se a equação 3.1. A Tabela 3.2 mostra os fatores calculados para cada velocidade de rotação. Os valores de M_{exp} estão demonstrados na Tabela 4.3 do capítulo Resultados e Discussão.

$$F_t = \frac{\eta_m}{M_{exp}} \quad [3.1]$$

Onde, F_t é o fator de correção da leitura de torque, η_m é a média da viscosidade medida em cada velocidade para a amostra 0 (zero) com o “spindle” SC4-18 e M_{exp} é a medida do torque, na velocidade específica para a qual o fator será aplicado, realizada com o “spindle” especial no reator sem aeração para a amostra 0 (zero).

Tabela 3.2. Fatores de correção dos “spindles” especiais.

Velocidade (rpm)	“Spindle” 1	“Spindle” 2	“Spindle” 3
20	31,1429	8,7200	5,8919
25	27,2501	8,0741	4,7391
30	19,8182	7,2667	4,0370
35	18,1667	5,7368	3,3030
40	16,7692	5,7368	2,9067
45	15,5714	5,0698	2,8312
50	12,1112	4,7391	2,4222
60	12,1112	3,8929	1,9123
80	8,7200	2,7250	1,2976
100	6,2286	2,0566	0,9237
120	5,0698	1,6029	0,6855
140	4,2745	1,2601	0,5278
160	3,5161	1,0283	0,4266
180	2,9863	0,8321	0,3444

3.5.1 Determinação da Viscosidade no Reator

As amostras, após serem misturadas e solubilizadas em um béquer, foram adicionadas ao reator apresentando temperatura média de 40°C. Com o banho ultratermostático já ligado aguardou-se até a temperatura da amostra atingir 50°C e então mais 10 minutos para a temperatura estabilizar-se.

Iniciou-se então as leituras, primeiramente sem aeração respeitando a ordem crescente de tamanho dos “spindles” especiais, assim primeiro o “spindle” nº1, em seguida o nº 2 e finalmente o de nº 3. Em seguida foram feitas as leituras sem aeração com adição de catalisador e enfim as leituras com aeração do reator e presença de catalisador, respeitando sempre a mesma ordem dos “spindles” especiais, totalizando 297 ensaios.

As leituras de torque realizadas em cada amostra foram feitas para velocidades crescentes de rotação do “spindle” compreendidas entre 15 e 200 rpm. Para cada velocidade de rotação o tempo de cisalhamento foi de 60 s.

A temperatura da amostra foi mantida constante em 50°C circulando-se água na camisa ao redor do reator, usando-se banho ultratermostático regulado para manter a temperatura em 51°C prevenindo assim as perdas de calor do sistema.

Os experimentos realizados em triplicata utilizaram a cada repetição uma amostra idêntica à anterior para evitar possíveis efeitos do tempo.

3.6. Processamento dos Dados Experimentais

Os resultados experimentais do comportamento reológico e das características do agitador foram analisados utilizando-se o software ORIGIN 5.0 e o software EXCEL 2000. As curvas de agitação foram ajustadas utilizando um ajuste do tipo potência e o parâmetro estatístico, coeficiente de determinação (R^2), que mede a proporção da variação total da média explicada pela regressão, definido como a soma quadrática total, foi calculado.

Resultados e Discussão

4.1 Caracterização da Matéria Prima

A composição em ácidos graxos do óleo de soja refinado foi fornecida pelo fabricante da mesma, e a composição em ácidos graxos da gordura vegetal hidrogenada de soja foi determinada pelo Laboratório de Óleos e Gorduras da FEA-UNICAMP, os valores estão descritos na Tabela 4.1 e apresentam-se de acordo com os valores médios encontrados por Lawson, 1985. A Figura A.7 do Apêndice mostra o cromatograma obtido para a gordura vegetal hidrogenada de soja.

Tabela 4.1 Composição em ácidos graxos da matéria prima.

Ácido Graxo	Composição (%)	
	Gordura vegetal hidrogenada de soja	Óleo de soja refinado
Palmítico (C16:0)	11,6	10,0
Esteárico (C18:0)	8,7	4,0
Oléico (C18:1)	65,5	21,0
	Trans 39,0 Cis 26,5	
Linoléico (C18:2)	11,2	54,0
	Trans 10,4 Cis 0,8	
Linolênico	0	8,0
Outros	3,0	0

Através da análise de densidade das matérias primas obteve-se para o óleo de soja o valor de 919,3 kg/m³ e para a gordura hidrogenada de soja o valor de 907,3 kg/m³. As análises foram realizadas em triplicata e os valores apresentados são a média aritmética dos resultados obtidos, com desvio padrão de 0,1 e 0,05 respectivamente.

4.2 Caracterização Reológica

Foi realizado um estudo da viscosidade de todas as amostras individualmente à temperatura de 50°C e em velocidades de rotação crescentes compreendidas entre 15 e 90rpm. Neste estudo verificou-se o comportamento newtoniano das amostras que apresentaram viscosidade constante na faixa de rotação entre 45 e 90 rpm, sendo que este comportamento pode ser verificado nas Figuras 4.1 e 4.2. A região de $\dot{\gamma} < 45$ rpm será desconsiderada devido às instabilidades apresentadas pelo reômetro. Este fato é típico a baixas velocidades em equipamentos onde se estabelece uma rotação fixa e mede-se o torque. Observou-se ainda um aumento no valor da viscosidade média a medida que o teor de gordura hidrogenada de soja aumentou. Dessa forma verifica-se que à temperatura de 50°C a amostra 0, composta apenas por óleo de soja apresentou a menor viscosidade média, 22,1mPa.s e a amostra 10, composta apenas por gordura vegetal hidrogenada de soja apresentou a maior viscosidade média, 31,7mPa.s. Na Tabela 4.2 pode ser observado claramente este aumento.

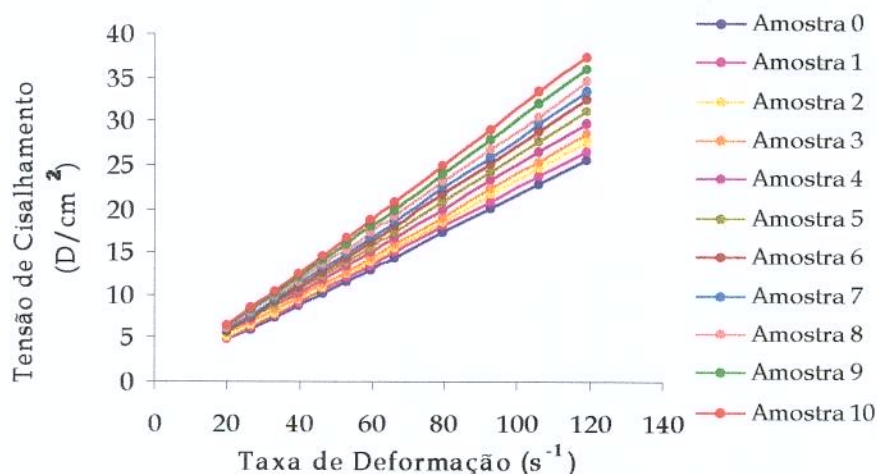


Figura 4.1. Relação entre taxa de deformação e tensão de cisalhamento para as amostras a 50°C.

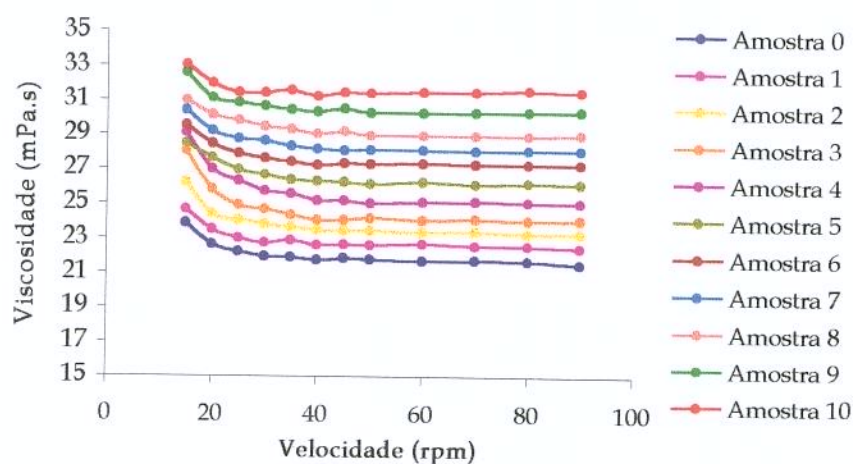


Figura 4.2. Perfil de viscosidade obtido com “spindle” SC4-18 para as amostras a 50°C.

Tabela 4.2. Viscosidade obtida com “spindle” SC4-18 para as amostras à 50°C.

Amostra	Viscosidade Média (mPa.s)
0	22,1
1	22,9
2	23,8
3	24,7
4	25,8
5	26,7
6	27,7
7	28,6
8	29,4
9	30,7
10	31,7

4.3 Torque

Com a finalidade de simular o progresso da reação de hidrogenação em condições semelhantes ao processo industrial foram realizadas medidas de torque utilizando os agitadores tipo turbina de Rushton (“spindles” especiais). Dessa maneira foi possível calcular a viscosidade das amostras bem como a potência consumida pelo agitador.

As leituras realizadas com e sem a presença de silicato, como simulador do catalisador, apresentaram valores iguais, não sendo possível detectar diferenças concluindo que sua presença não afeta o comportamento reológico da mistura nas condições destes experimentos.

Na Tabela 4.3 estão representados os valores médios do torque corrigidos pelo fator do “spindle” correspondente. O “spindle” 3 apresentou em todas as amostras os maiores valores de torque e o “spindle” 1 apresentou os menores valores de torque, resultado esperado devido às dimensões dos mesmos. Entre as amostras para um mesmo “spindle” as leituras apresentaram valores crescentes nos ensaios sem aeração, com exceção da amostra 10 que em todos os ensaios inclusive aqueles com aeração, apresentou um valor inferior ao encontrado para a amostra 9. Nos ensaios com aeração não se observou a mesma sequência encontrada nas leituras sem aeração, isso acontece devido ao caos produzido pelas bolhas de ar produzidas durante a aeração. Essa presença de caos afetou as leituras do reômetro, como pode ser observado na Tabela 4.3, praticamente ofuscando o efeito das diferenças de velocidade de rotação do “spindle” especial (agitador).

Tabela 4.3 Torque obtido com os “spindles especiais” para as amostras à 50°C.

Amostra	Média do Torque (Nm $\times 10^3$)			Média do Torque (Nm $\times 10^3$)		
	Ensaio sem aeração			Ensaio com aeração		
	“Spindle” 1	“Spindle” 2	“Spindle” 3	“Spindle” 1	“Spindle” 2	“Spindle” 3
0	2,3	6,5	15,9	2,7	7,2	16,5
1	2,4	6,6	15,1	3,0	7,8	17,5
2	2,4	6,9	16,4	2,7	7,6	17,5
3	2,5	7,1	16,8	2,8	8,2	18,7
4	2,6	7,2	16,8	3,1	8,0	18,1
5	2,7	7,4	17,0	3,0	7,9	18,3
6	2,8	7,6	17,6	3,1	8,1	18,4
7	2,8	7,6	17,2	3,2	8,1	18,2
8	2,8	7,8	17,9	3,4	9,0	20,2
9	3,1	8,1	18,2	3,4	9,3	20,3
10	3,0	8,0	18,1	3,3	8,7	19,7

4.4 Viscosidade

Na determinação da viscosidade através dos agitadores foi utilizada a equação 4.1, a qual contém o fator de correção da leitura de viscosidade citado no Capítulo 3 - Materiais e Métodos, desta dissertação. A Tabela 4.4 apresenta as médias aritméticas das viscosidades encontradas para as velocidades de rotação, variando de 100 a 180rpm. As demais velocidades foram desconsideradas pois estavam fora da faixa de estabilidade do equipamento, isto é, rotações muito baixas em que o equipamento não tem condições de mantê-las constantes sob o efeito de carga (torque ativo). As viscosidades apresentaram para os ensaios sem aeração, desvio padrão de 0,4 e para os ensaios com aeração um desvio padrão de 0,9. Observou-se que as viscosidades obtidas pelos agitadores apresentam o mesmo comportamento dos valores obtidos pelo “spindle” SC4-18, ou seja, comportamento newtoniano. As Figuras A.1 até A.6 encontradas no apêndice apresentam os perfis de viscosidade para todos os casos estudados.

$$\eta_{\text{exp}} = M_{\text{exp}} \cdot F \quad [4.1]$$

Tabela 4.4. Viscosidade obtida com os “spindles” especiais para as amostras à 50°C.

Amostra	Viscosidade (mPa.s)					
	Sem aeração			Com aeração		
	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
0	21,2	19,3	20,0	24,5	20,6	20,6
1	22,2	19,5	21,0	26,1	21,8	21,6
2	22,5	20,8	21,5	24,5	21,5	21,9
3	22,8	21,4	22,0	25,1	22,6	22,8
4	23,8	21,5	22,2	26,6	22,2	22,0
5	25,0	22,2	22,3	26,7	22,4	22,6
6	25,3	22,4	22,6	27,5	23,2	23,0
7	25,5	22,6	22,8	28,0	23,0	22,7
8	26,2	23,3	23,3	30,2	24,9	24,5
9	28,7	23,8	23,7	29,9	25,7	24,8
10	27,0	23,8	23,6	29,1	24,4	24,4

As Figuras 4.3 a 4.5 mostram que a viscosidade é crescente com o aumento do teor de gordura hidrogenada na amostra, nos ensaios com e sem aeração, e para todos os agitadores. Constatamos assim que a utilização da medida do torque gerado pelo agitador de um reator de hidrogenação permite avaliar o progresso da reação.

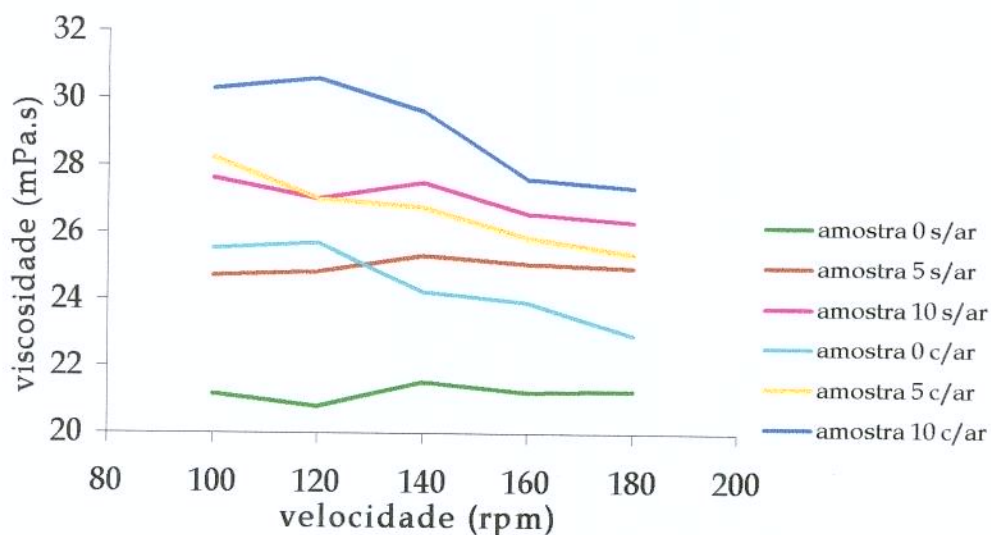


Figura 4.3. Perfil de viscosidade obtido com o “spindle” especial 1.

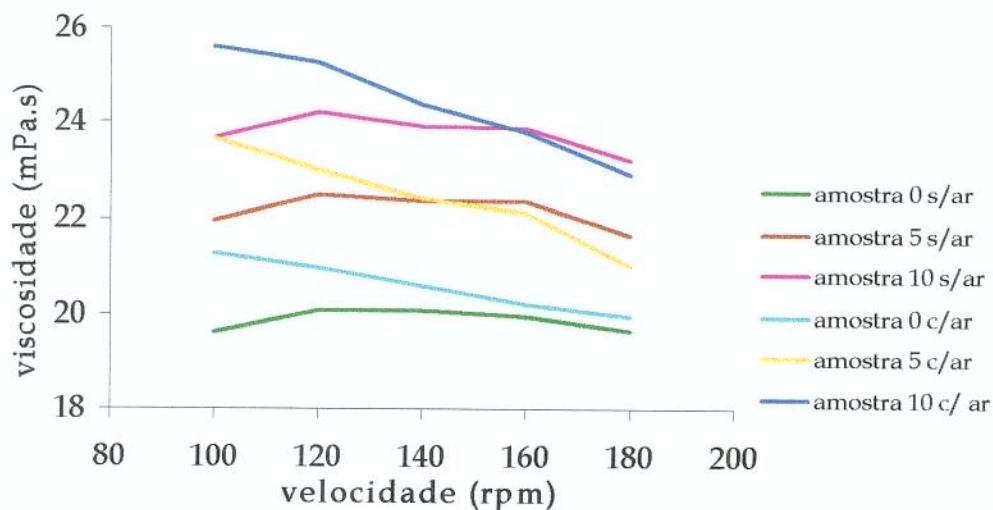


Figura 4.4. Perfil de viscosidade obtido com o “spindle” especial 2.

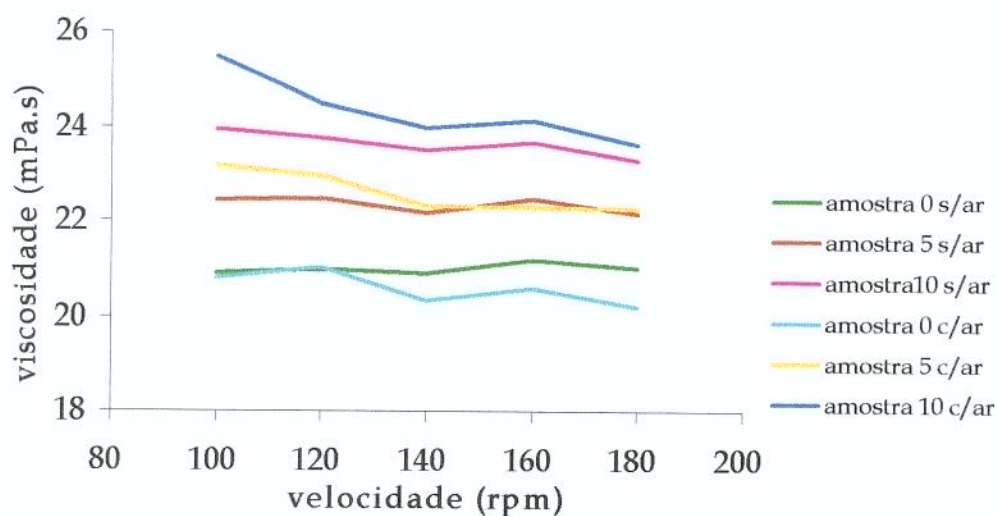


Figura 4.5. Perfil de viscosidade obtido com o “spindle” especial 3.

4.5 Potência Consumida

Neste estudo foram utilizados os valores de torque obtidos para as rotações variando entre 20 e 180 rpm. Todos os valores utilizados nos cálculos deste estudo estavam em unidades do Sistema Internacional.

No cálculo do número de potência foi utilizado um fator de correção para a turbina de quatro pás proposto por Rushton e seus colaboradores e citado na revisão bibliográfica. O valor deste fator foi de 0,72. A viscosidade utilizada no cálculo do número de Reynolds para todos os casos foi aquela obtida com o “spindle” SC4-18 utilizando o adaptador do próprio equipamento.

As Tabelas A.1 até A.22 encontradas no Apêndice, apresentam os valores dos números de Reynolds e potência encontrados para cada amostra. Para construir as curvas de agitação de cada agitador, nos ensaios com e sem aeração, foi considerada a média

aritmética dos valores de N_{Po} e de N_{Re} obtidos para cada amostra em uma determinada rotação. As Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam os valores utilizados na construção das curvas de agitação que estão representadas nas Figuras 4.6 a 4.17. As curvas foram ajustadas por um comportamento do tipo potência descrito na equação 4.2. A Tabela 4.5 apresenta os parâmetros de ajuste desse modelo para cada curva.

$$N_{Po} = C.(N_{Re})^c \quad [4.2]$$

Tabela 4.5. Parâmetros de ajuste das curvas N_{Po} versus N_{Re}

Parâmetros	Rushton	Sem aeração			Com aeração		
		Spindle 1	Spindle 2	Spindle 3	Spindle 1	Spindle 2	Spindle 3
C	188,05	1306,3	479,49	218,41	2487,5	1499,4	908,11
c	-1,3775	-0,8873	-0,6755	-0,5291	-0,9982	-0,8754	-0,7678
R ²	0,998	0,996	0,987	0,975	0,999	0,996	0,984

Tabela 4.6. Valores de N_{Re} e N_{Po} para ensaios sem aeração.

“Spindle” Especial 1		“Spindle” Especial 2		“Spindle” Especial 3	
N_{Re}	N_{Po}	N_{Re}	N_{Po}	N_{Re}	N_{Po}
18,7	97,3	33,1	49,2	51,3	30,8
23,4	80,5	41,4	41,0	64,1	25,6
28,0	72,0	49,7	35,3	76,9	22,3
32,7	61,9	57,9	30,9	89,7	19,9
37,4	51,5	66,2	27,0	102,5	17,9
42,1	45,9	74,5	24,4	115,3	16,5
46,7	42,7	82,8	23,1	128,2	15,7
56,1	35,3	99,4	20,3	153,8	14,3
74,8	26,7	132,5	16,5	205,1	12,4
93,4	22,7	165,6	14,6	256,3	11,3
112,1	19,5	198,7	13,4	307,6	10,5
130,8	17,4	231,8	12,4	358,8	9,9
149,5	15,8	264,9	11,7	410,1	9,5

Tabela 4.7. Valores de N_{Re} e N_{Po} para ensaios com aeração.

“Spindle” Especial 1		“Spindle” Especial 2		“Spindle” Especial 3	
N_{Re}	N_{Po}	N_{Re}	N_{Po}	N_{Re}	N_{Po}
18,7	131,1	33,1	72,7	51,3	48,4
23,4	103,6	41,4	60,1	64,1	40,0
28,0	95,6	49,7	51,0	76,9	33,5
32,7	78,9	58,0	42,6	89,7	28,6
37,4	66,6	66,2	37,8	102,5	25,0
42,1	59,2	74,5	33,1	115,4	22,6
46,7	53,7	82,8	30,4	128,2	20,4
56,1	44,4	99,4	26,0	153,8	17,6
74,8	32,4	132,5	19,5	205,1	14,0
93,4	26,5	165,6	16,5	256,4	11,9
112,1	22,2	198,7	14,2	307,6	10,9
130,8	19,1	231,8	12,8	358,9	10,1
149,5	16,9	264,9	11,8	410,2	9,6
168,2	15,4	298,1	11,1	461,4	9,3

Analisando as Figuras 4.6 a 4.17 é possível observar que a curva encontrada para os agitadores está deslocada de um determinado fator da curva proposta por Rushton e seus colaboradores para turbinas com 6 pás retas. Fica claro que esse deslocamento está relacionado ao valor do N_{Re} .

Foram calculados fatores de correção para a curva experimental encontrada. Através das equações de ajuste obteve-se os valores para o N_{Re} , mantendo o N_{Po} constante para todos os “spindles”, nas condições com e sem aeração. O fator calculado, denominado fator individual, foi obtido pela média aritmética dos valores encontrados através da divisão do N_{Re} de um determinado “spindle” especial pelo N_{Re} da curva proposta por Rushton e seus colaboradores. A partir dos valores encontrados para o fator individual calculou-se o fator geral através da média aritmética dos valores obtidos, para cada fator individual. A Tabela 4.8 apresenta os valores obtidos para cada fator calculado.

Tabela 4.8. Fatores de correção da curva de agitação experimental

"Spindle"	Fator individual	Fator geral
1 sem aeração	16,4	16,7
2 sem aeração	13,7	16,7
3 sem aeração	10,3	16,7
1 com aeração	20,1	16,7
2 com aeração	20,3	16,7
3 com aeração	19,3	16,7

Analisando-se as Figuras 4.6 a 4.17 observa-se que o fator individual deslocou adequadamente as curvas de todos os agitadores nos ensaios com e sem aeração, com exceção do agitador 3 sem aeração onde o deslocamento provocado pelo fator não foi suficiente para sobrepor a curva proposta por Rushton. O fator geral promoveu um deslocamento tão satisfatório quanto o fator individual com exceção dos agitadores 2 e 3 com aeração onde o deslocamento foi mais adequado utilizando o fator individual. Adotou-se portanto o fator geral visando simplificar o ajuste.

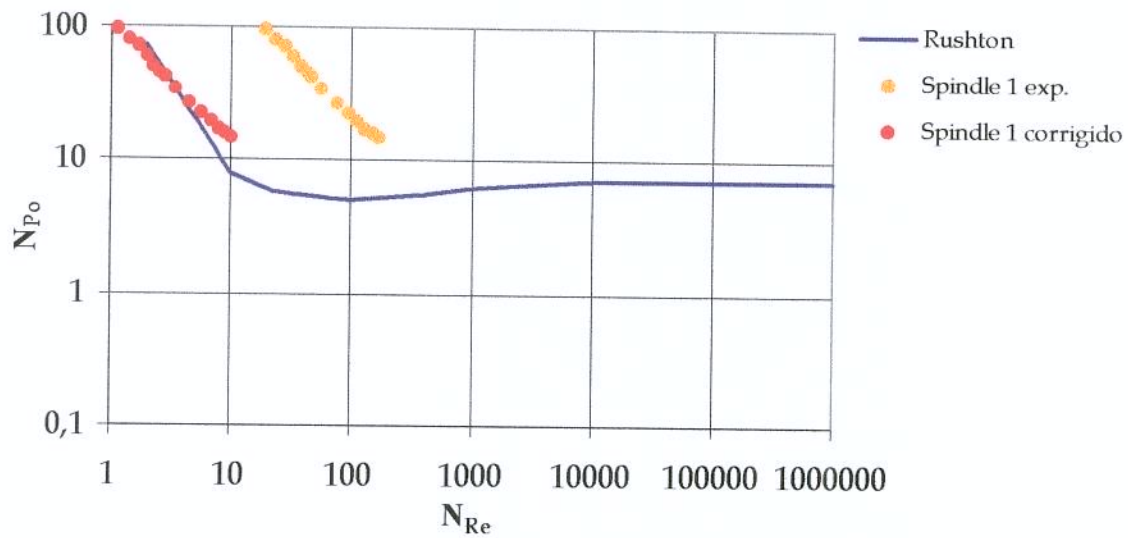


Figura 4.6. “Spindle” especial 1 sem aeração (fator geral).

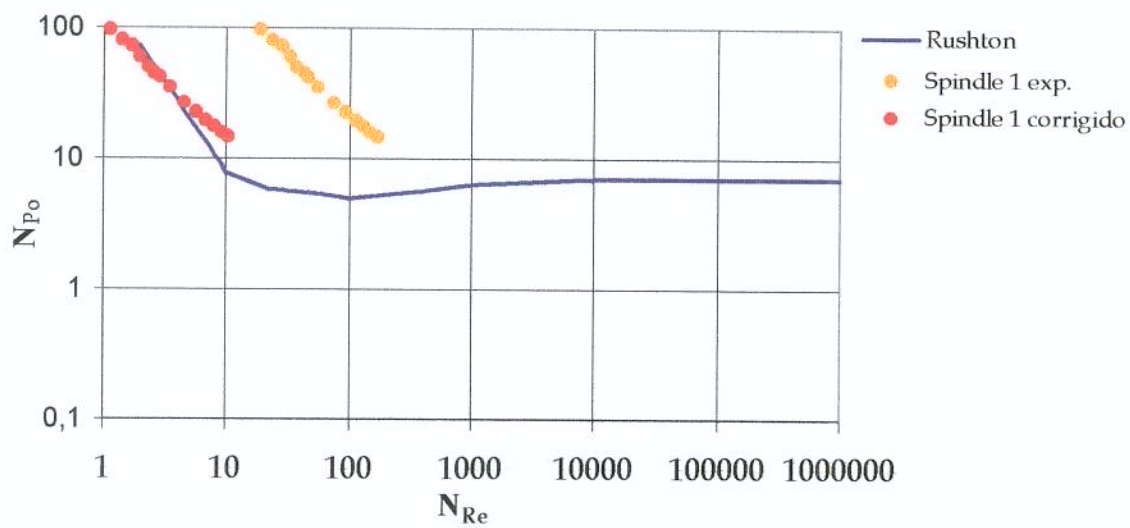


Figura 4.7. “Spindle” especial 1 sem aeração (fator individual).

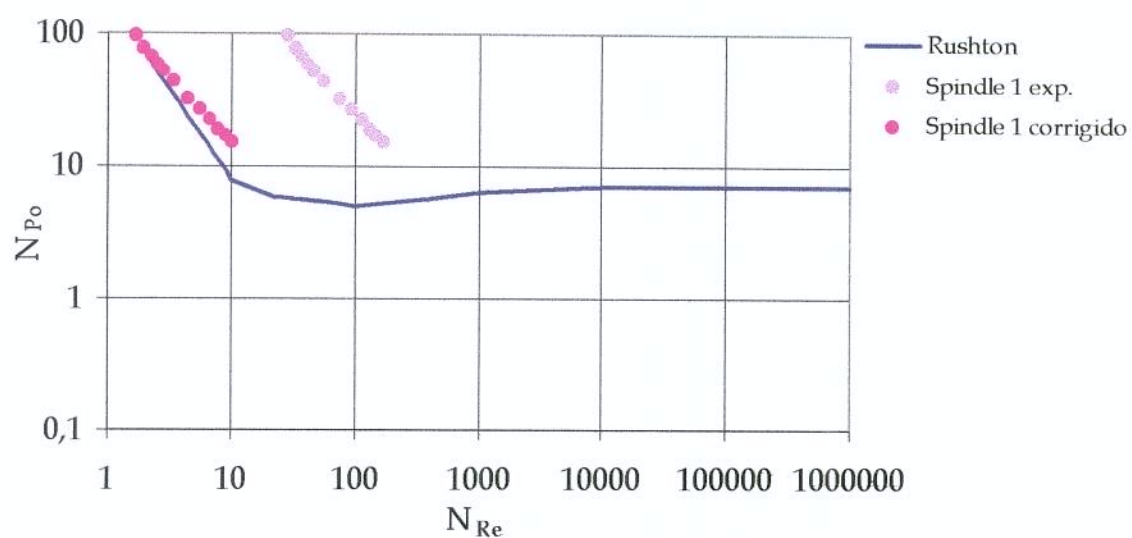


Figura 4.8. “Spindle” especial 1 com aeração (fator geral).

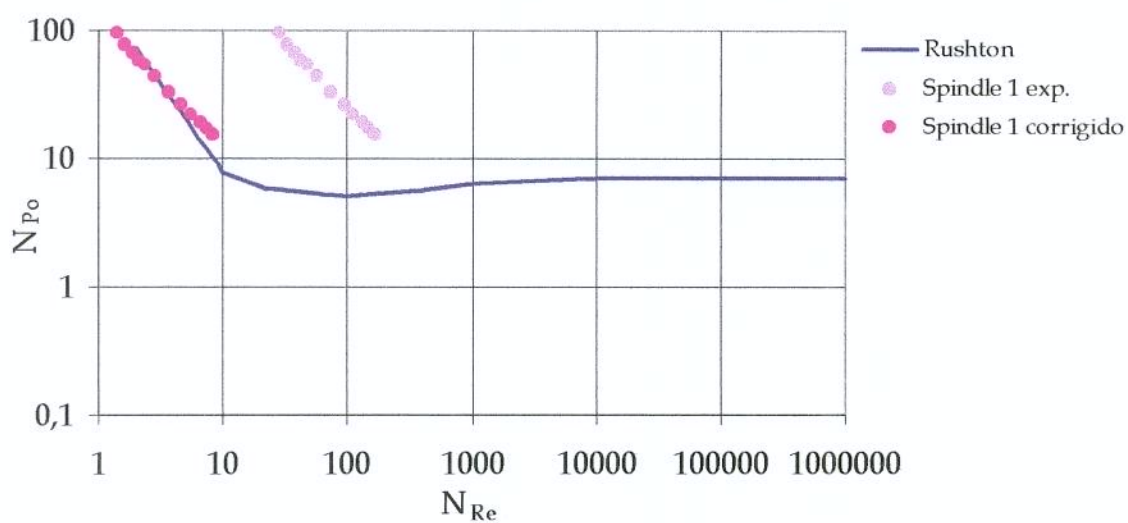


Figura 4.9. “Spindle” especial 1 com aeração (fator individual).

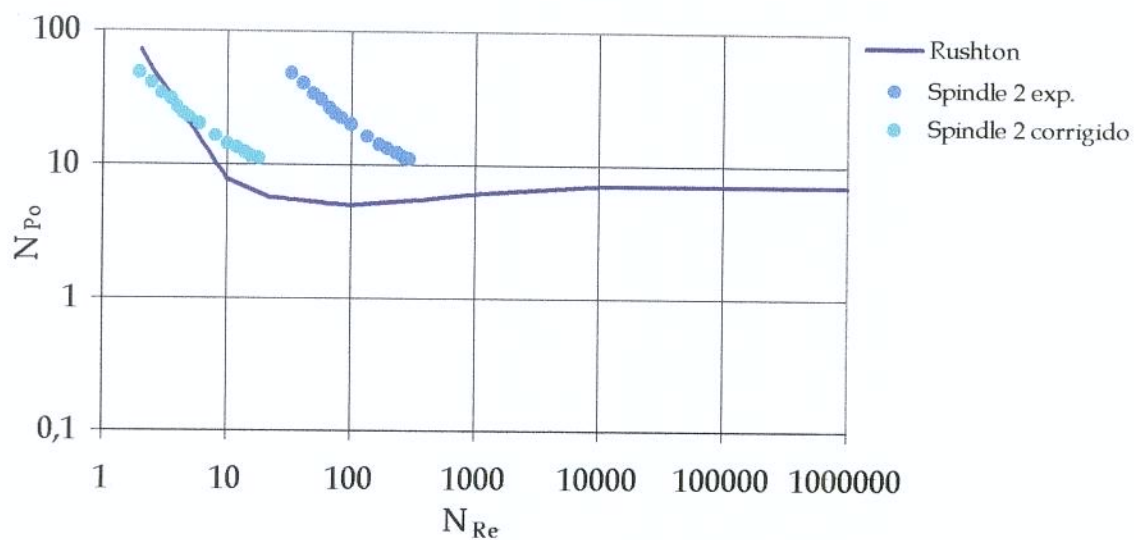


Figura 4.10. “Spindle” especial 2 sem aeração (fator geral).

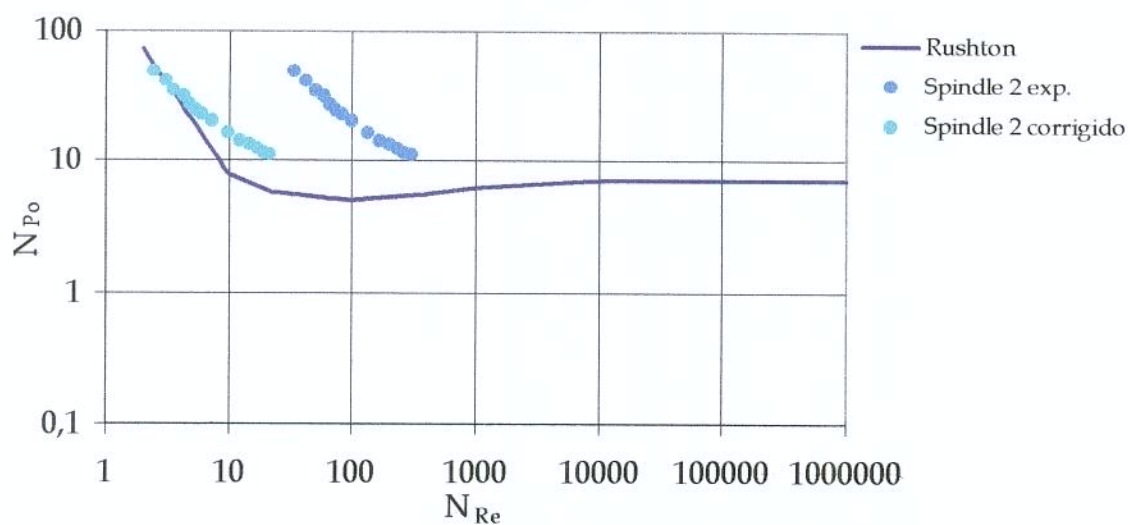


Figura 4.11. “Spindle” especial 2 sem aeração (fator individual).

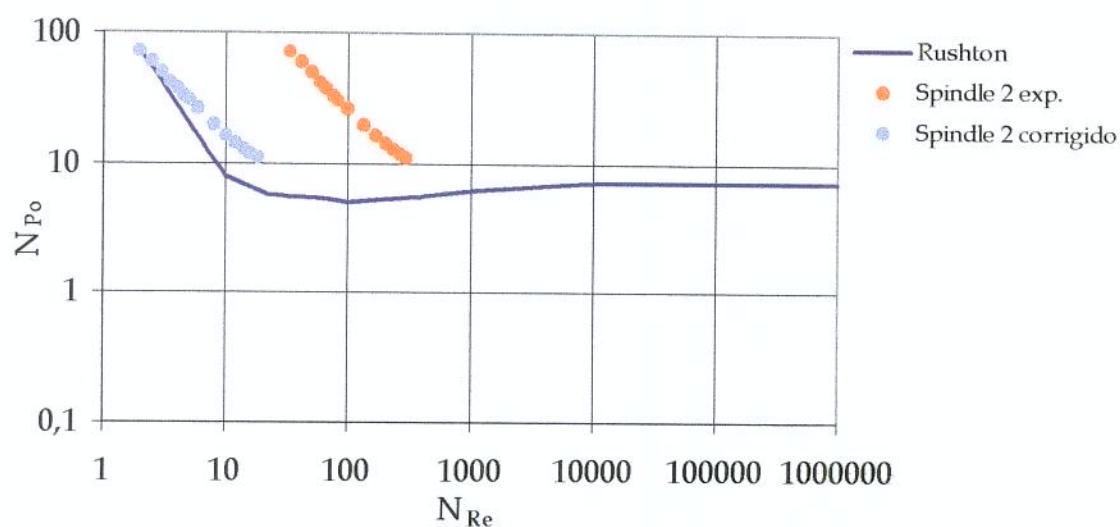


Figura 4.12. “Spindle” especial 2 com aeração (fator geral).

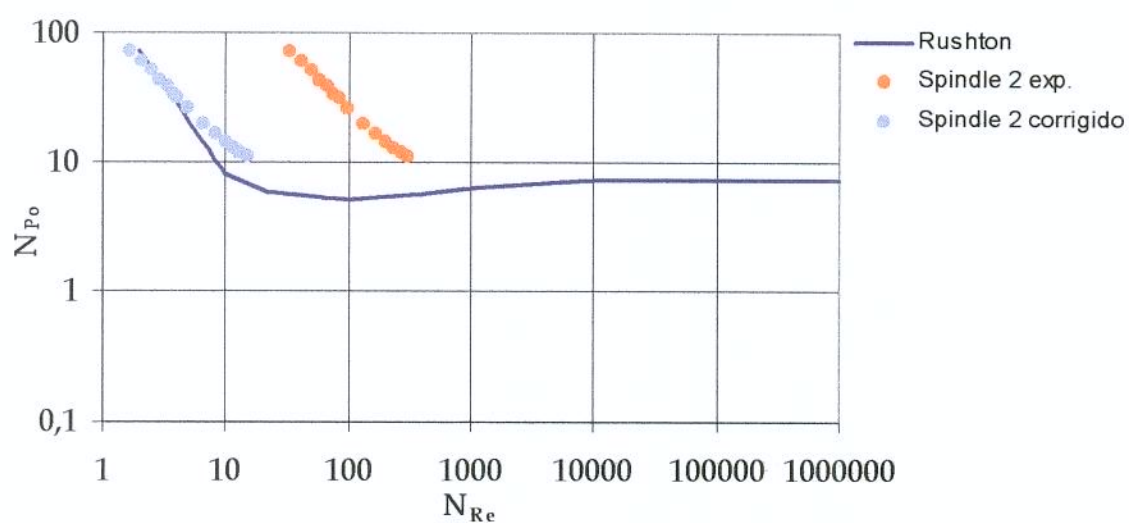


Figura 4.13. “Spindle” especial 2 com aeração (fator individual).

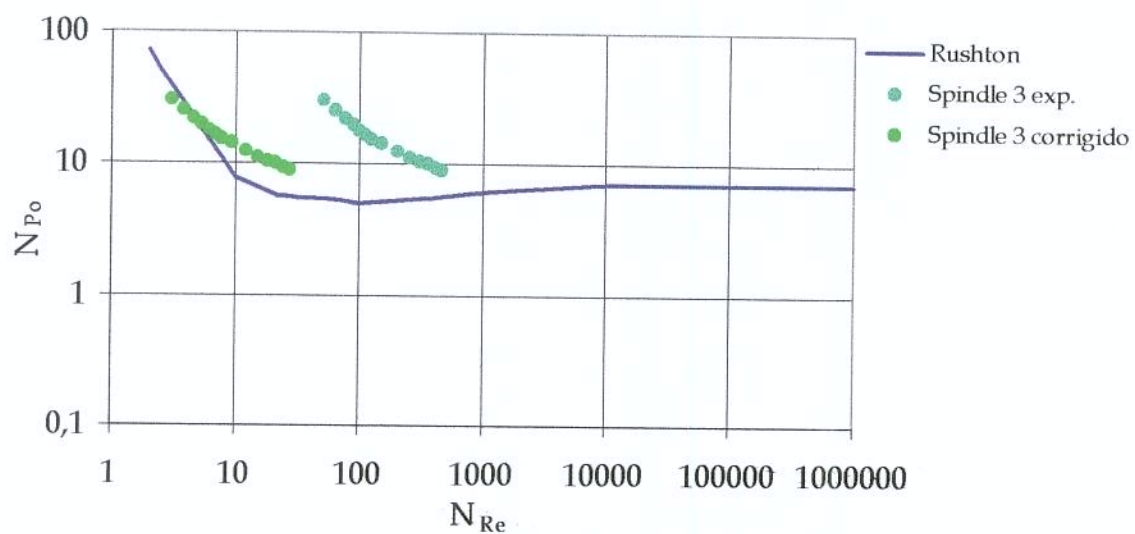


Figura 4.14. “Spindle” especial 3 sem aeração (fator geral).

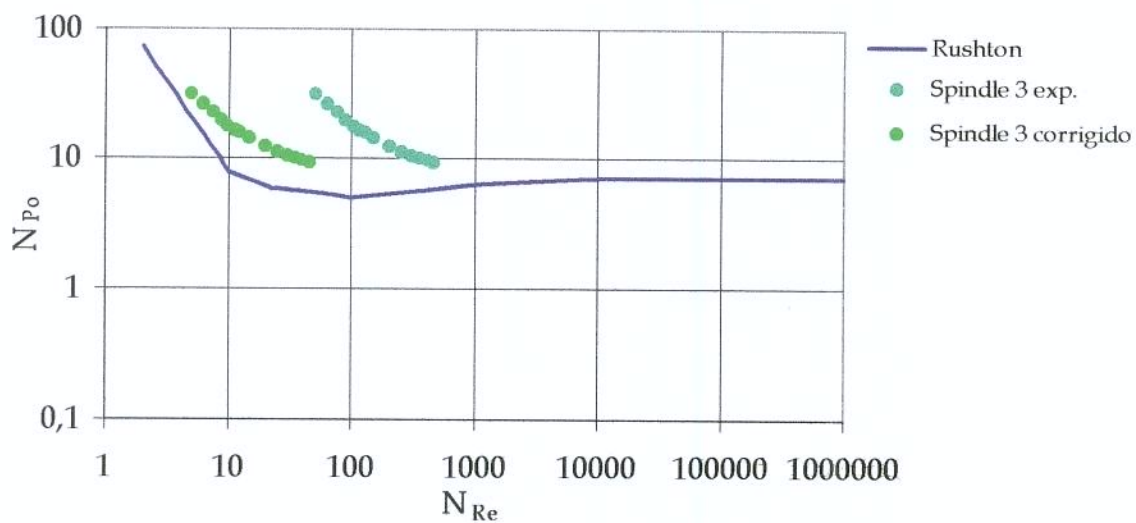


Figura 4.15. “Spindle” especial 3 sem aeração (fator individual).

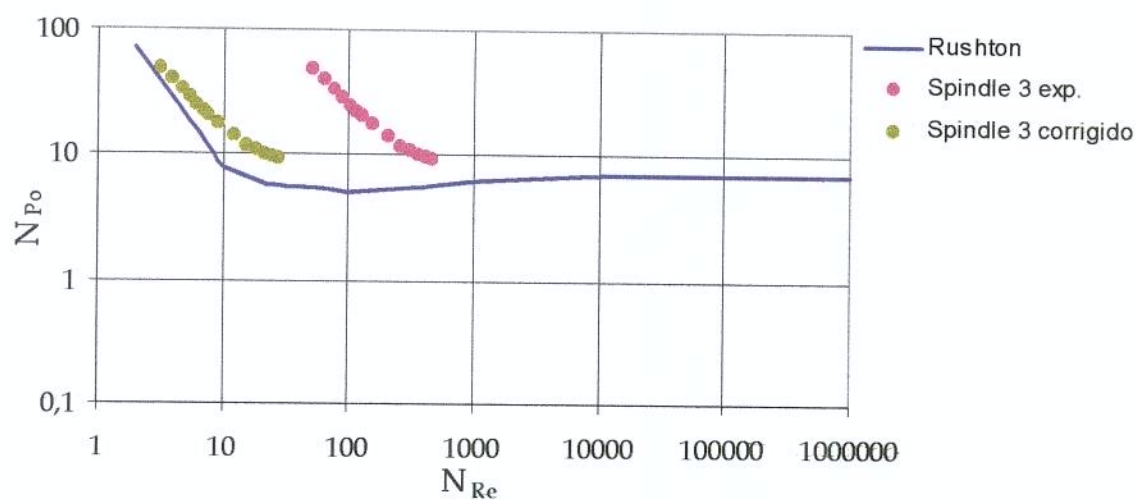


Figura 4.16. “Spindle” especial 3 com aeração (fator geral).

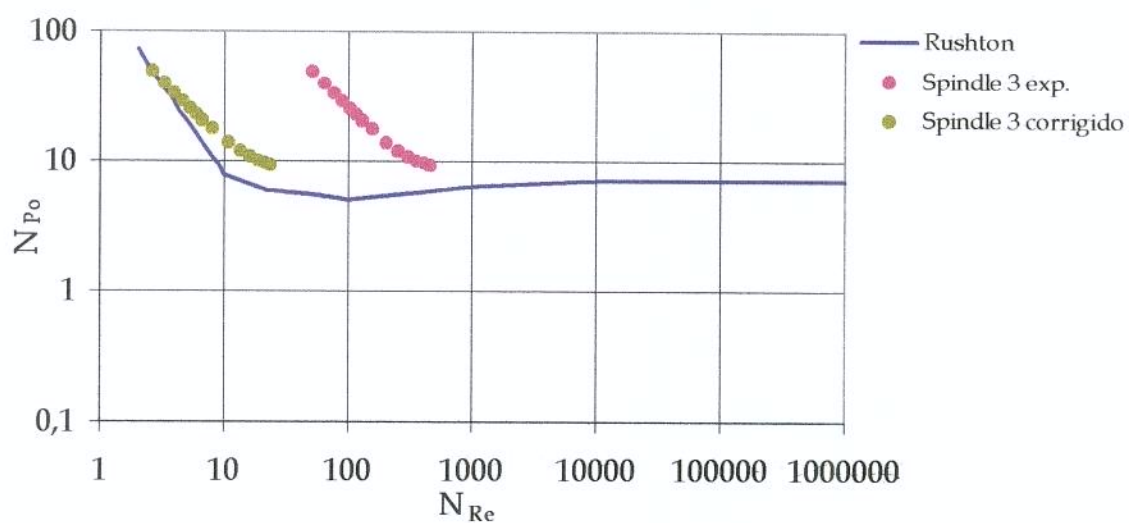


Figura 4.17. “Spindle” especial 3 com aeração (fator individual).

Conclusões

1. À temperatura de 50°C a viscosidade é crescente com o aumento do teor de gordura hidrogenada, assim a amostra 0, composta apenas por óleo de soja apresentou a menor viscosidade média, 22,1mPa.s e a amostra 10, composta apenas por gordura vegetal hidrogenada de soja apresentou a maior viscosidade média, 31,7mPa.s.
2. A presença do catalisador não afeta o comportamento reológico da mistura nas condições destes experimentos, pelo menos dentro da sensibilidade do instrumento usado.
3. Os valores de torque obtidos foram crescentes conforme o aumento nas dimensões dos agitadores. Entre as amostras para um mesmo agitador as leituras apresentaram valores crescentes nos casos sem aeração, com exceção da amostra 10 que em todos os ensaios inclusive aqueles com aeração, apresentou um valor inferior ao encontrado para a amostra 9
4. Nos ensaios com aeração não se observou a mesma sequência encontrada nas leituras sem aeração, pois o caos produzido pela aeração praticamente ofuscou o efeito das diferenças de velocidade de rotação do agitador.
5. Observou-se que o comportamento obtido pelos agitadores do tipo turbina foi o mesmo daquele obtido pelo “spindle” SC4-18, ou seja, isso é muito importante, pois dá às leituras obtidas com as turbinas uma relação unívoca com a viscosidade.

6. A viscosidade é crescente com o aumento do teor de gordura hidrogenada na amostra, nos ensaios com e sem aeração e para todos os agitadores. Consequentemente a utilização da medida do torque gerado pelo agitador de um reator de hidrogenação permite avaliar o progresso da reação.
7. As curvas de agitação apresentaram um comportamento ao qual foi possível ajustar um modelo do tipo potência.
8. As curvas encontradas para os agitadores está deslocada de um determinado fator da curva proposta por Rushton e seus colaboradores para turbinas com 6 pás retas. Esse deslocamento está relacionado ao valor do N_{Re} e o fator foi determinado como sendo 16,7.

Sugestões

1. Desenvolver em escala piloto o estudo da metodologia proposta nesta dissertação, utilizando reatores e condições iguais ao processo convencional. Este estudo é necessário para desenvolver uma adequada metodologia de ampliação de escala. É importante lembrar que muitos reatores reais, de grande porte, utilizados em outros processos, fazem uso de motores com rotação variável, que se ajusta à medida que ocorre variação na demanda de potência.
2. Estudar o comportamento reológico de outros óleos vegetais para verificar se a metodologia se aplica a qualquer processo de hidrogenação desses óleos.
3. Aplicar o presente estudo em reômetros capazes de medir com precisão e estabilidade o torque gerado a velocidades de rotação inferiores a 50 rpm.

Referências Bibliográficas

ALBRIGHT, L. Partial Hydrogenation of Triglyceride Oils: Relationship Between Chemical Reactions, Physical Transfer Steps and Adsorption Steps. In: HASTERT, R. **Hydrogenation: AOCS COLLOQUIUM**, 1987. Proceedings. Champaign: AOCS, cap. 2, p.11-29

ALLEN, R.R. Hydrogenation Research. **Journal of The American Oil Chemists' Society**, Champaign, v. 63, n.10, p. 1323-1332, 1986.

ALLEN, R. R. Hydrogenation. In: SWERN, D. **Bailey's Industrial Oil And Fat Products**. 4ª ed. New York, John Wiley & Sons, 1982. v. 2, cap. 1, p. 1-95.

ALLEN, R. R. Principles and Catalysts for Hidrogenation of Fats and Oils. **Journal of The American Oil Chemists' Society**, Champaign, v. 55, n. 11, p.792-795, 1978.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. **An Introduction to Rheology**. New York, Elsevier Science Publishers, 1989. 198p.

BECKMANN, H. J. Hydrogenation Practice. **Journal of The American Oil Chemists' Society**, Champaign, v. 60, n. 02, p. 234A-242A, 1983.

BIRD, R.B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**. EUA, John Wiley & Sons, 1960. 780p.

BOBBIO, P. A., BOBBIO, F. O. **Química do Processamento de Alimentos**. Campinas: Livraria Varela, 1984. 232p.

BOGER, D. V., TIU, C. Rheological Properties of Food Products and Their Use in the Design of Flow Systems. **Food Technology in Australia**, Clayton, v.26, n.8, p.325-335, 1974.

BRAUER, H. Power Consumption in Aerated Stirred Tank Reactor Systems. **Advances in Biochemical Engineering**, New York, v.13, 1979.

CABRERA, A. G. V. **Construção e Avaliação do Desempenho de um Reator Tipo "Loop" na Hidrogenação de Óleo de Soja**. Campinas, 1996. 137 p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas.

COENEN, J. W. E. Hydrogenation of Edible Oils. **Journal of The American Oil Chemists' Society**, Champaign, v. 53, p. 382-389, 1976.

COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. **Chemical Engineering - Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer**. Great Britain: Butterworth Heinemann, 1997. v.1, 774p.

EDVARDSSON, J. & IRANDOUST, S. Reactors For Hydrogenation of Edible Oils. **Journal of The American Oil Chemists' Society**, Champaign, v.71, n. 03, p.235-242, 1994.

EL SHATTORY, Y.; DEMAN, L; DEMAN, J. M. Evaluation of Hydrogenation Catalysts Activity. **Journal of The American Oil Chemists' Society**, Champaign, v.57, n.12, p.402-404, 1980.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Process and Unit Operations**. New Jersey: Prentice Hall PTR., 1993. 921p.

GROTHUES, B. G. M. Hydrogenation of Palm and Lauric Oil. **Journal of The American Oil Chemists' Society**, Champaign, v.62, n.02, p.390-399, 1985.

GUNSTONE, F.D.; NORRIS, F. A. **Lipids in Foods- Chemistry, Biochemistry and Technology**. Great Britain, Pergamon Press, 1983.

GUPTA, S. K. **Momentum Transfer Operations**. New Delhi, Mc Graw Hill Publishing Company Limited, 1979. 351p.

HOLDSWORTH, S. D. Applicability of Rheological Models to the Interpretations of Flow and Processing Behaviour of Fluid Food Products. **Journal of Texture Studies**, v.4, n.2, p.393-418, 1971.

HOLDSWORTH, S. D. Rheological Models Used for the Prediction of the Flow Properties of Food Products: A Literature Review. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, v.71, part C, p.139-179, 1993.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY. Standard Methods for the Analysis of Oils, Fats and Derivatives. 7th rev. ed. Oxford. Blackwell Scientific, p31-33 método 2.101, 1987.

LAWSON, H. W. **Standards for Fats & Oils**. The L. J. Minor Foodservices Standards Series v.5., The AVI Publishing Company, 1985. 235p.

LIPS, L. A Influência do Catalisador na Estrutura da Hidrogenação dos Óleos Comestíveis e Ácidos Graxos. **Revista Óleos e Grãos**, n. 13, p. 21-24, 1993.

LOZANO, D. C. **Estudo da Caracterização das propriedades Reológicas de Caldos de Fermentação**. Campinas, 1982. 74p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas.

MACRAE, R.; ROBINSON, R. K.; SADLER, M. J. Sensory Evaluation. In: *Encyclopaedia of Food Science*, San Diego, **Food Technology and Nutrition**, v.6, 699p., 1993.

MC CABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. Sigapora: Mc Graw Hill International Editions, 1993. 1129p.

METZNER, A. B. Non - Newtonian Technology: Fluid Mechanics, Mixing and Heat Transfer. **American Chemical Engineering**. v.1, p. 76-153, 1956.

PATTERSON, H. B. W. Hydrogenation of Vegetable Oils - The Hydrogenation Process. **Oléagineux**, ano 28, n. 12, 1973.

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. **Chemical Engineer's Handbook**. Japan: Mc Graw Hill Kogakusha, 1973.

PINEDO, A. A. **Projeto e Desempenho de um Reator de Recirculação para Hidrogenação**. Campinas, 1995. 82p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas.

RAO, M. A. Measurement of Flow Properties of Fluids Foods-Developments, Limitations and Interpretation of Phenomena. Connecticut. **Journal of Texture Studies** 8(3):257-282, 1977.

RAO, M. A. Rheological Properties of Fluid Foods. In: RAO, M. A. & RIZVI, S.S.H. (EDS), Engineering Properties of Foods, MARCEL DEKKER, New York, **Food Science and Technology**, nº19, p.1-47, 1986.

RAUEM, A. M. Química de Lipídeos e Hidrogenação. **Revista Óleos e Grãos**, ano IV, n. 18, p. 36-40, 1994.

RUSHTON, J. H.; COSTICH, E. W.; EVERETT, H. J. Power Characteristics of Mixing Impellers – Part I. New York, **Chemical Engineering Progress**, v.46, n.8, 1950.

SCHRAMM, G. **A Pratical Approach to Rheology and Rheometry**. Karlsruhe: Gebrueder Haake Gmbh, 1994. 290 p.

SILVA, F. C. **Reologia do Suco de Acerola: Efeito da Concentração e da Temperatura**. Campinas, 2000. 110p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas.

SKELLAND, A. H. P. **Non-Newtonian Flow and Heat Transfer**. New York: John Wiley & Sons, 1967. 469p.

VAN WAZER, J. R.; LYONS, J. W.; KIM, K. Y., COLWELL, R. E. **Viscosity and Flow Measurement. A Laboratory Handbook of Rheology**. New York: Interscience, 1963.

WHITE, G. W. Rheology in Food Research. **Journal of Food Technology**, v.5, p.1-32, 1970.

APÊNDICE

Tabela A.1. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 0 sem aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
82,3	37,0	25,6	22,5	39,9	61,7
68,2	32,6	21,1	28,1	49,8	77,1
58,1	28,8	19,0	33,7	59,8	92,5
56,9	24,9	17,5	39,4	69,7	107,9
44,8	22,6	15,8	45,0	79,7	123,4
42,1	20,4	14,8	50,6	89,7	138,8
41,0	19,6	14,2	56,2	99,6	154,2
32,3	16,9	13,0	67,5	119,6	185,1
23,0	14,5	11,4	89,9	159,4	246,7
19,7	13,2	10,5	112,4	199,3	308,4
16,5	12,1	9,9	134,9	239,1	370,1
14,9	11,3	9,4	157,4	279,0	431,8
13,7	10,5	9,0	179,9	318,8	493,5
12,8	10,1	8,8	202,4	358,7	555,2

Tabela A.2. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 0 com aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
121,0	59,0	43,1	22,5	39,9	61,7
89,8	51,1	33,3	28,1	49,8	77,1
83,9	39,6	27,3	33,7	59,8	92,5
69,5	34,8	24,5	39,4	69,7	107,9
58,1	31,3	21,7	45,0	79,7	123,4
51,6	26,8	18,7	50,6	89,7	138,8
51,1	26,3	17,8	56,2	99,6	154,2
39,8	22,0	15,4	67,5	119,6	185,1
30,0	17,0	12,3	89,9	159,4	246,7
23,8	14,4	10,5	112,4	199,3	308,4
20,4	12,6	9,9	134,9	239,1	370,1
16,8	11,6	9,2	157,4	279,0	431,8
15,4	10,7	8,8	179,9	318,8	493,5
13,8	10,3	8,4	202,4	358,7	555,2

Tabela A.3. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 1 sem aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
106,5	47,5	29,1	21,4	38,0	58,8
83,6	38,5	23,9	26,8	47,5	73,5
62,4	33,4	20,5	32,2	57,0	88,3
56,9	28,4	17,8	37,5	66,5	103,0
47,2	25,2	15,8	42,9	76,0	117,7
42,1	21,7	14,7	48,3	85,5	132,4
36,4	20,6	14,0	53,6	95,0	147,1
32,3	18,4	12,7	64,3	114,0	176,5
24,5	14,6	10,8	85,8	152,0	235,3
20,1	13,1	9,9	107,2	190,0	294,2
17,5	11,9	9,3	128,7	228,1	353,0
15,8	11,0	8,8	150,1	266,1	411,8
14,2	10,4	8,5	171,6	304,1	470,7
13,4	9,9	8,2	193,0	342,1	529,5

Tabela A.4. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 1 com aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
140,4	69,5	48,2	21,4	38,0	58,8
114,6	56,3	39,3	26,8	47,5	73,5
94,7	49,9	32,8	32,2	57,0	88,3
80,6	38,9	27,3	37,5	66,5	103,0
67,8	37,3	23,7	42,9	76,0	117,7
60,2	30,6	20,9	48,3	85,5	132,4
53,4	28,3	19,0	53,6	95,0	147,1
43,0	25,2	16,8	64,3	114,0	176,5
31,8	18,1	13,4	85,8	152,0	235,3
25,4	15,4	11,4	107,2	190,0	294,2
21,2	13,6	10,4	128,7	228,1	353,0
18,5	12,2	9,5	150,1	266,1	411,8
16,1	11,3	9,1	171,6	304,1	470,7
14,9	10,5	8,7	193,0	342,1	529,5

Tabela A.5. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 2 sem aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
77,4	41,7	26,8	20,8	36,9	57,1
68,2	36,3	22,9	26,0	46,1	71,3
60,2	30,9	20,0	31,2	55,3	85,6
52,2	27,2	18,0	36,4	64,5	99,8
42,4	23,7	16,5	41,6	73,7	114,1
40,2	22,0	15,9	46,8	82,9	128,4
38,7	21,1	15,3	52,0	92,1	142,6
30,1	18,5	14,0	62,4	110,6	171,2
23,9	15,5	11,8	83,2	147,4	228,2
20,1	13,8	10,8	104,0	184,3	285,3
17,7	12,7	10,1	124,8	221,1	342,3
16,3	11,7	9,6	145,6	258,0	399,4
14,5	11,1	9,3	166,4	294,9	456,4
13,6	10,6	9,0	187,2	331,7	513,5

Tabela A.6. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 2 com aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
111,3	64,8	41,6	20,8	36,9	57,1
92,9	54,8	34,3	26,0	46,1	71,3
68,8	47,9	29,7	31,2	55,3	85,6
63,2	39,3	26,9	36,4	64,5	99,8
53,2	35,3	22,9	41,6	73,7	114,1
49,7	30,0	19,4	46,8	82,9	128,4
42,6	27,2	18,3	52,0	92,1	142,6
37,1	23,3	16,1	62,4	110,6	171,2
27,2	17,8	12,9	83,2	147,4	228,2
23,2	15,2	11,2	104,0	184,3	285,3
20,2	13,3	10,5	124,8	221,1	342,3
17,6	11,9	9,7	145,6	258,0	399,4
15,1	11,2	9,4	166,4	294,9	456,4
14,0	10,5	9,0	187,2	331,7	513,5

Tabela A.7. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 3 sem aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
125,9	90,3	50,5	20,2	35,8	55,4
96,0	62,2	40,5	25,3	44,8	69,3
92,5	59,7	36,4	30,3	53,7	83,2
71,1	44,6	31,7	35,4	62,7	97,0
55,7	40,8	26,4	40,4	71,6	110,9
52,6	35,9	24,4	45,5	80,6	124,7
48,0	32,0	20,8	50,5	89,5	138,6
40,3	26,6	17,9	60,6	107,4	166,3
27,2	19,8	14,0	80,8	143,3	221,7
24,4	16,8	11,8	101,0	179,1	277,2
20,4	13,6	11,0	121,3	214,9	332,6
17,6	12,8	10,2	141,5	250,7	388,1
15,8	11,6	9,6	161,7	286,5	443,5
14,3	10,7	9,3	181,9	322,3	498,9

Tabela A.8. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 3 com aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
92,0	44,0	28,0	20,2	35,8	55,4
68,2	37,0	23,6	25,3	44,8	69,3
62,4	32,4	20,7	30,3	53,7	83,2
60,1	28,0	18,6	35,4	62,7	97,0
47,2	24,9	16,8	40,4	71,6	110,9
41,1	22,6	15,7	45,5	80,6	124,7
36,4	21,7	14,9	50,5	89,5	138,6
30,1	19,2	13,7	60,6	107,4	166,3
23,9	15,8	12,2	80,8	143,3	221,7
20,1	14,2	11,2	101,0	179,1	277,2
18,3	13,0	10,5	121,3	214,9	332,6
16,2	12,0	9,9	141,5	250,7	388,1
14,7	11,4	9,6	161,7	286,5	443,5
14,0	10,9	9,2	181,9	322,3	498,9

Tabela A.9. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 4 sem aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
101,7	49,8	28,7	19,2	34,0	52,7
80,5	40,8	24,4	24,0	42,5	65,9
71,0	34,0	21,4	28,8	51,0	79,1
60,1	30,2	19,1	33,6	59,6	92,3
52,0	25,8	17,7	38,4	68,1	105,5
44,0	24,2	16,0	43,2	76,6	118,7
44,1	22,2	15,4	48,0	85,1	131,9
34,4	20,2	13,9	57,6	102,1	158,2
26,0	16,3	12,2	76,8	136,1	211,0
21,9	14,2	11,2	96,0	170,2	263,7
19,0	13,1	10,4	115,2	204,2	316,5
17,1	12,2	9,9	134,4	238,2	369,2
15,2	11,4	9,4	153,6	272,2	421,9
14,2	10,9	9,1	172,8	306,3	474,7

Tabela A.10. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 4 com aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
135,5	77,6	55,2	19,2	34,0	52,7
105,3	66,7	44,2	24,0	42,5	65,9
109,7	52,5	34,0	28,8	51,0	79,1
94,8	45,0	31,1	33,6	59,6	92,3
72,6	37,6	25,0	38,4	68,1	105,5
66,9	31,1	23,5	43,2	76,6	118,7
56,5	29,6	20,0	48,0	85,1	131,9
44,1	26,2	17,9	57,6	102,1	158,2
31,8	19,1	13,5	76,8	136,1	211,0
26,3	15,7	11,7	96,0	170,2	263,7
21,4	13,9	10,6	115,2	204,2	316,5
19,0	12,4	9,5	134,4	238,2	369,2
16,6	11,4	9,2	153,6	272,2	421,9
14,8	10,9	9,0	172,8	306,3	474,7

Tabela A.11. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 5 sem aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
96,8	50,9	32,2	18,5	32,8	50,7
83,6	43,7	26,1	23,1	40,9	63,4
77,4	35,5	22,1	27,7	49,1	76,0
60,1	31,8	19,7	32,3	57,3	88,7
49,6	26,9	17,7	37,0	65,5	101,4
46,9	24,0	16,4	41,6	73,7	114,1
41,0	22,8	15,7	46,2	81,9	126,7
36,0	20,2	14,3	55,4	98,3	152,1
26,9	16,6	12,4	73,9	131,0	202,8
23,0	14,8	11,3	92,4	163,8	253,5
19,8	13,5	10,6	110,9	196,5	304,2
17,6	12,6	10,0	129,4	229,3	354,9
16,2	11,8	9,6	147,9	262,0	405,6
15,0	11,2	9,3	166,3	294,8	456,3

Tabela A.12. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 5 com aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
116,2	67,1	47,8	18,5	32,8	50,7
92,9	56,3	37,0	23,1	40,9	63,4
96,8	43,7	32,5	27,7	49,1	76,0
77,4	42,7	26,3	32,3	57,3	88,7
60,5	34,4	23,8	37,0	65,5	101,4
53,5	30,4	21,6	41,6	73,7	114,1
48,0	28,0	20,5	46,2	81,9	126,7
44,1	24,3	17,8	55,4	98,3	152,1
31,8	18,5	14,0	73,9	131,0	202,8
26,3	16,0	11,7	92,4	163,8	253,5
21,5	13,8	10,8	110,9	196,5	304,2
18,6	12,6	10,0	129,4	229,3	354,9
16,7	11,7	9,5	147,9	262,0	405,6
15,2	10,8	9,3	166,3	294,8	456,3

Tabela A.13. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 6 sem aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
106,5	52,1	33,8	17,7	31,5	48,7
83,6	43,0	28,3	22,2	39,3	60,9
75,3	36,0	24,9	26,6	47,2	73,0
63,2	32,1	21,9	31,1	55,0	85,2
58,1	28,7	19,3	35,5	62,9	97,4
49,7	25,8	18,0	39,9	70,8	109,5
46,5	24,3	16,7	44,4	78,6	121,7
38,2	21,1	15,0	53,2	94,4	146,1
27,5	17,1	12,8	71,0	125,8	194,7
23,8	14,9	11,6	88,7	157,3	243,4
20,3	13,7	10,9	106,5	188,7	292,1
17,7	12,6	10,2	124,2	220,2	340,8
16,1	12,0	9,8	142,0	251,6	389,5
15,1	11,4	9,4	159,7	283,1	438,2

Tabela A.14. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 6 com aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
111,3	64,8	37,7	17,7	31,5	48,7
108,4	57,1	38,0	22,2	39,3	60,9
94,7	46,8	30,6	26,6	47,2	73,0
71,1	38,6	23,5	31,1	55,0	85,2
78,7	32,7	23,5	35,5	62,9	97,4
56,4	29,5	23,3	39,9	70,8	109,5
53,4	29,6	19,6	44,4	78,6	121,7
45,7	25,3	17,3	53,2	94,4	146,1
32,1	19,5	13,9	71,0	125,8	194,7
26,9	16,4	12,0	88,7	157,3	243,4
22,6	14,6	11,0	106,5	188,7	292,1
19,6	12,9	10,3	124,2	220,2	340,8
17,0	12,0	9,7	142,0	251,6	389,5
15,5	11,3	9,4	159,7	283,1	438,2

Tabela A.15. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 7 sem aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
101,7	50,9	29,9	17,2	30,5	47,2
86,7	43,0	25,1	21,5	38,1	59,0
77,4	35,5	22,1	25,8	45,7	70,8
64,8	32,5	19,7	30,1	53,3	82,6
53,2	28,4	18,2	34,4	61,0	94,4
46,9	25,8	16,6	38,7	68,6	106,2
41,8	24,3	15,7	43,0	76,2	118,0
36,0	21,2	14,3	51,6	91,4	141,5
28,1	17,1	12,5	68,8	121,9	188,7
23,8	15,0	11,5	86,0	152,4	235,9
20,0	13,8	10,7	103,2	182,9	283,1
18,2	12,8	10,1	120,4	213,4	330,3
16,3	12,1	9,7	137,6	243,9	377,5
15,3	11,4	9,4	154,8	274,3	424,6

Tabela A.16. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 7 com aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
116,2	53,3	40,4	17,2	30,5	47,2
92,9	54,1	36,3	21,5	38,1	59,0
94,7	48,4	31,4	25,8	45,7	70,8
86,9	41,6	27,0	30,1	53,3	82,6
70,2	36,8	23,7	34,4	61,0	94,4
60,2	34,1	21,0	38,7	68,6	106,2
57,3	30,2	19,8	43,0	76,2	118,0
46,8	26,0	16,5	51,6	91,4	141,5
37,2	19,2	13,8	68,8	121,9	188,7
28,1	16,9	11,8	86,0	152,4	235,9
22,9	14,1	10,7	103,2	182,9	283,1
19,5	12,7	10,2	120,4	213,4	330,3
17,4	11,7	9,6	137,6	243,9	377,5
15,7	11,2	9,3	154,8	274,3	424,6

Tabela A.17. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 8 sem aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
87,1	52,1	33,0	16,6	29,5	45,7
80,5	43,0	26,8	20,8	36,9	57,1
73,1	38,6	24,2	25,0	44,2	68,5
64,8	33,6	21,6	29,1	51,6	79,9
55,7	29,5	19,2	33,3	59,0	91,3
45,9	26,5	17,6	37,4	66,4	102,7
48,0	24,8	16,5	41,6	73,7	114,1
37,6	21,9	15,1	49,9	88,5	137,0
28,4	17,4	13,0	66,6	118,0	182,6
24,0	15,7	11,9	83,2	147,5	228,3
20,6	14,2	11,1	99,9	177,0	273,9
18,8	13,1	10,4	116,5	206,5	319,6
16,9	12,4	10,0	133,1	236,0	365,2
15,8	11,7	9,7	149,8	265,5	410,9

Tabela A.18. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 8 com aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
169,4	88,0	58,6	16,6	29,5	45,7
111,5	64,5	46,5	20,8	36,9	57,1
101,1	59,7	39,0	25,0	44,2	68,5
75,9	45,7	32,8	29,1	51,6	79,9
73,8	43,4	29,3	33,3	59,0	91,3
63,1	38,6	26,8	37,4	66,4	102,7
60,4	34,8	24,4	41,6	73,7	114,1
50,6	29,3	19,6	49,9	88,5	137,0
36,0	22,1	15,3	66,6	118,0	182,6
29,8	18,5	13,1	83,2	147,5	228,3
24,7	15,3	11,7	99,9	177,0	273,9
21,3	13,9	10,8	116,5	206,5	319,6
18,8	12,7	10,2	133,1	236,0	365,2
16,9	11,8	9,8	149,8	265,5	410,9

Tabela A.19. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 9 sem aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
106,5	54,4	35,0	15,9	28,3	43,7
86,7	44,5	29,6	19,9	35,3	54,7
81,8	40,1	25,0	23,9	42,4	65,6
71,1	35,2	22,2	27,9	49,4	76,5
58,1	30,7	19,7	31,9	56,5	87,5
54,5	27,4	18,1	35,9	63,6	98,4
48,0	26,3	17,2	39,9	70,6	109,3
40,9	23,0	15,7	47,8	84,8	131,2
31,2	18,2	13,4	63,8	113,0	174,9
26,9	16,1	12,1	79,7	141,3	218,7
22,7	14,5	11,3	95,6	169,5	262,4
20,2	13,5	10,6	111,6	197,8	306,1
18,5	12,6	10,1	127,5	226,0	349,8
17,0	11,9	9,7	143,5	254,3	393,6

Tabela A.20. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 9 com aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
150,1	86,8	61,0	15,9	28,3	43,7
123,9	72,6	48,2	19,9	35,3	54,7
114,0	61,7	40,6	23,9	42,4	65,6
93,3	48,4	33,5	27,9	49,4	76,5
78,7	47,2	28,0	31,9	56,5	87,5
66,9	38,6	25,9	35,9	63,6	98,4
61,2	35,4	23,0	39,9	70,6	109,3
49,5	29,7	19,5	47,8	84,8	131,2
36,0	22,6	15,6	63,8	113,0	174,9
28,8	18,7	13,3	79,7	141,3	218,7
24,6	16,1	11,9	95,6	169,5	262,4
20,9	14,3	11,0	111,6	197,8	306,1
18,7	13,2	10,3	127,5	226,0	349,8
17,2	12,2	9,9	143,5	254,3	393,6

Tabela A.21. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 10 sem aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
111,3	60,2	36,1	15,4	27,3	42,3
96,0	48,9	29,6	19,3	34,1	52,8
92,5	42,7	25,5	23,1	41,0	63,4
71,1	36,3	22,3	27,0	47,8	74,0
58,1	30,7	19,7	30,8	54,6	84,5
51,6	28,1	18,1	34,7	61,4	95,1
48,0	26,1	17,0	38,5	68,3	105,7
40,3	22,9	15,5	46,2	81,9	126,8
30,3	18,2	13,4	61,6	109,2	169,1
25,8	16,0	12,1	77,0	136,5	211,3
21,5	14,6	11,2	92,4	163,8	253,6
19,1	13,5	10,6	107,9	191,1	295,9
17,2	12,6	10,1	123,3	218,4	338,1
15,8	11,9	9,7	138,7	245,8	380,4

Tabela A.22. Valores de N_{Po} e N_{Re} obtidos para amostra 10 com aeração.

N_{Po}			N_{Re}		
"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3	"Spindle" 1	"Spindle" 2	"Spindle" 3
145,2	78,7	48,9	15,4	27,3	42,3
111,5	65,2	42,8	19,3	34,1	52,8
101,1	50,9	34,4	23,1	41,0	63,4
83,8	48,8	30,3	27,0	47,8	74,0
62,9	38,8	27,1	30,8	54,6	84,5
69,8	38,2	23,6	34,7	61,4	95,1
58,9	32,4	21,3	38,5	68,3	105,7
47,3	27,9	18,8	46,2	81,9	126,8
35,4	21,2	14,8	61,6	109,2	169,1
28,3	17,3	12,8	77,0	136,5	211,3
24,3	15,2	11,6	92,4	163,8	253,6
20,5	13,7	10,8	107,9	191,1	295,9
17,8	12,6	10,3	123,3	218,4	338,1
16,4	11,8	9,9	138,7	245,8	380,4

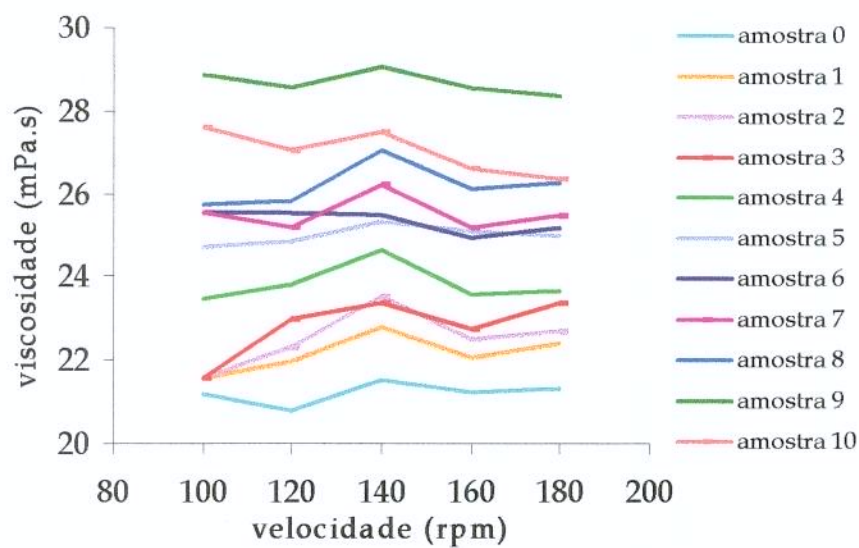


Figura A.1. Perfil de viscosidade obtido com “spindle” 1 em ensaios sem aeração.

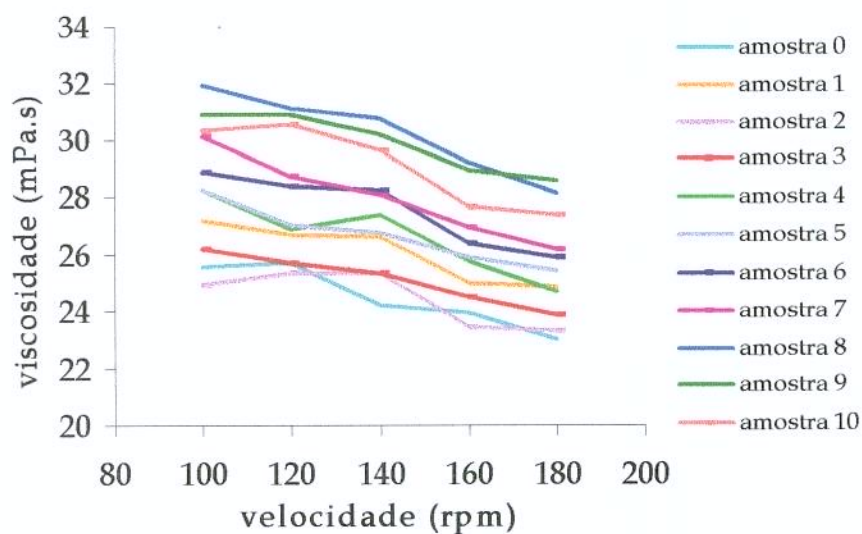


Figura A.2. Perfil de viscosidade obtido com spindle 1 em ensaios com aeração.

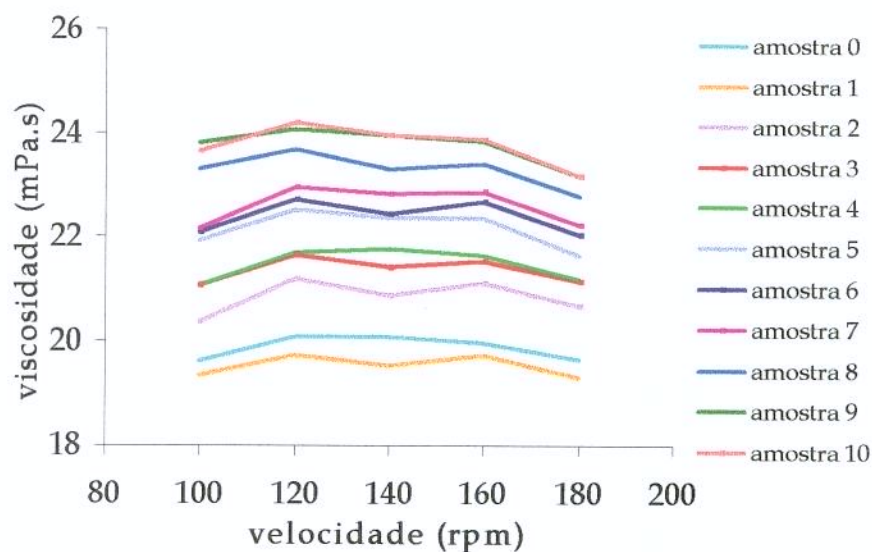


Figura A.3. Perfil de viscosidade obtido com o "spindle" 2 em ensaios sem aeração.

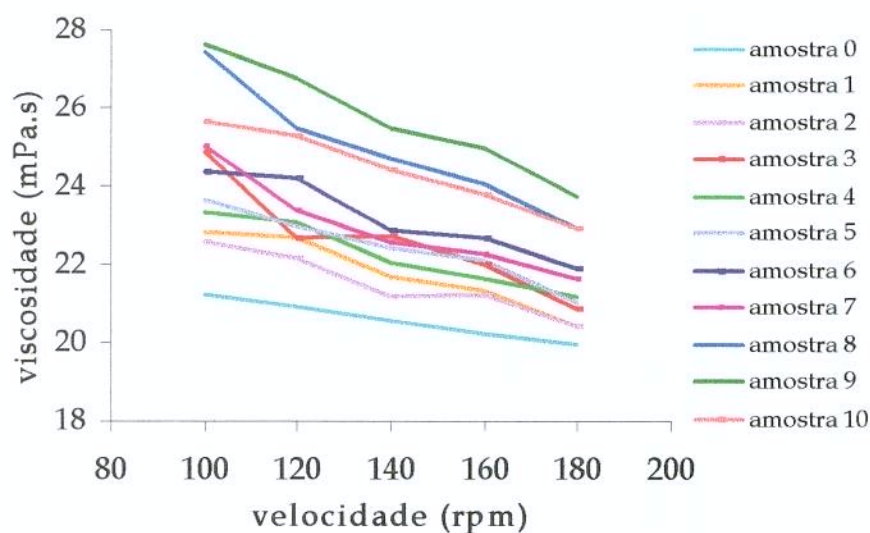


Figura A.4. Perfil de viscosidade obtido com o spindle 2 em ensaios com aeração.

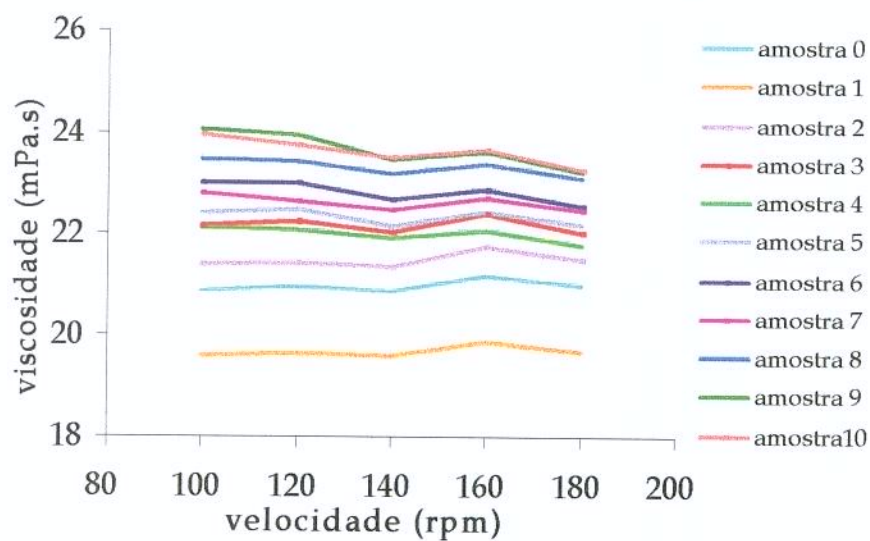


Figura A.5. Perfil de viscosidade obtido com o spindle 3 em ensaios sem aeração.

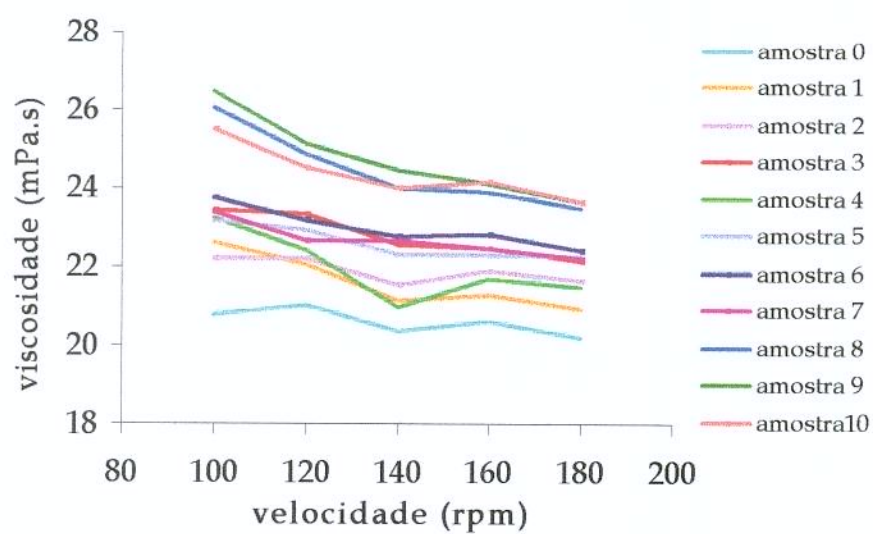


Figura A.6. Perfil de viscosidade obtido com o spindle 3 em ensaios com aeração.

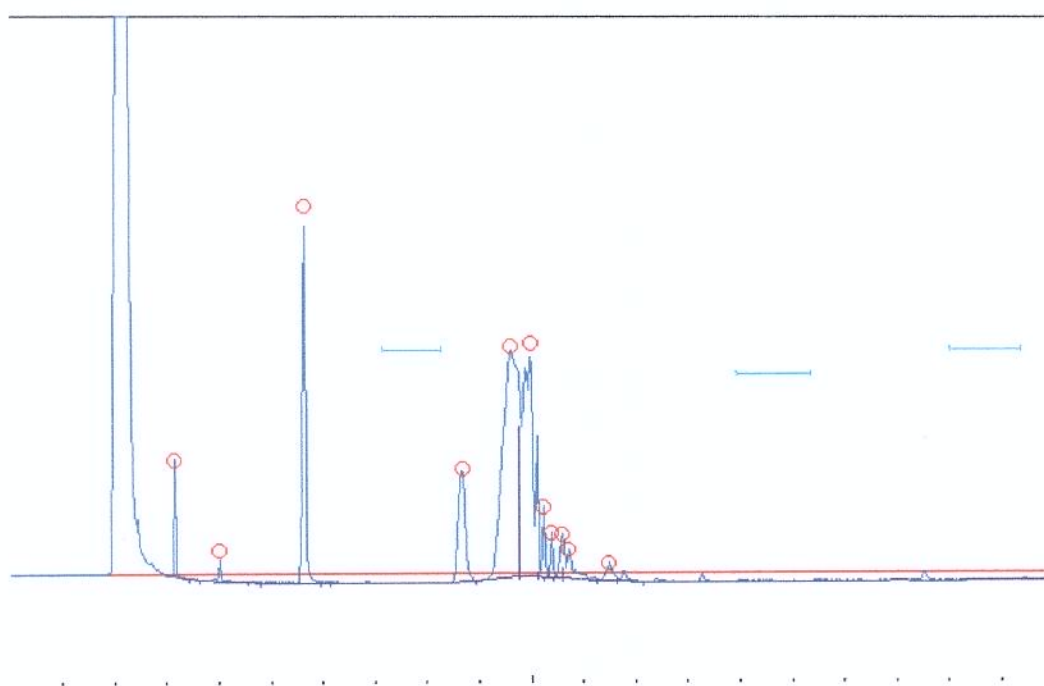


Figura A.7. Cromatograma gordura vegetal hidrogenada Maeda Choc Cover (DC-Soja).