

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**VIABILIDADE DE USO DE UM MISTURADOR PARA A ANÁLISE DE
PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS.**

FLÁVIA QUEIROZ COSTA

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP - Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Agronomia - Área de
Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP
Janeiro – 2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**VIABILIDADE DE USO DE UM MISTURADOR PARA A ANÁLISE DE
PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS.**

FLÁVIA QUEIROZ COSTA

Orientador: Prof. Dr. José Angelo Cagnon

Co-orientadora: Profa. Dra. Neusa Maria Pavão Battaglini

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP - Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Agronomia - Área de
Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP

Janeiro – 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Costa, Flávia Queiroz, 1964-
C837v Viabilidade de uso de um misturador para a análise de propriedades reológicas de produtos alimentícios / Flávia Queiroz Costa. - Botucatu : [s.n.], 2007.
x, 100 f. : il. color., gráfs, tabs.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2007
Orientador: José Angelo Cagnon
Co-Orientador : Neusa Maria Pavão Battaglini
Inclui bibliografia

1. Reologia. 2. Viscosidade. 3. Misturador. 4. Pêssego. 5. Mel. I. Cagnon, José Angelo. II. Battaglini, Neusa Maria Pavão. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

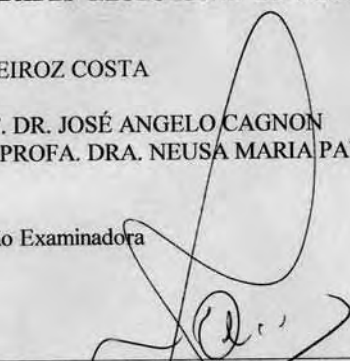
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: "VIABILIDADE DE USO DE UM MISTURADOR PARA A ANÁLISE DE
PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS"**

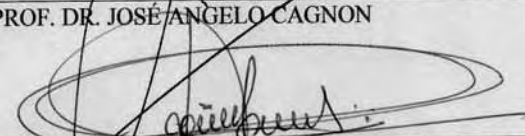
ALUNA: FLÁVIA QUEIROZ COSTA

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ ANGELO CAGNON
CO-ORIENTADORA: PROFA. DRA. NEUSA MARIA PAVÃO BATTAGLINI

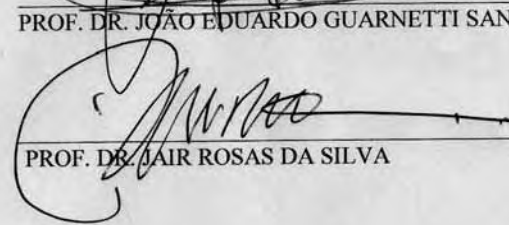
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. JOSÉ ANGELO CAGNON



PROF. DR. JOÃO EDUARDO GUARNETTI SANTOS



PROF. DR. JAIR ROSAS DA SILVA

Data da Realização: 04 de maio de 2007.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. José Ângelo Cagnon pela orientação, coragem e paciência.

À professora Dr^a. Neusa Maria Pavão Battaglini pela orientação, pela amizade e compreensão nos momentos difíceis.

Ao professor Dr. Paulo César Razuk, pela primeira orientação e carinho.

Ao Colégio Técnico Industrial “Prof. Isaac Portal Roldan” – UNESP - Bauru pelo suporte e carinho.

Ao CERAT – Centro de Estudos de Raízes e Amidos Tropicais – UNESP – Botucatu pela permissão para o uso viscosímetro rotacional Brookfield.

Ao técnico do Laboratório do CERAT, Luis Henrique Urbano, pela ajuda precisa e paciência.

À minha família, em especial a minha mãe, pelo apoio e imensa força para vencer mais essa etapa da minha vida, pois sem vocês nada disso seria possível.

À Ana Paula Cerino Coutinho, pela amizade, ajuda, carinho e força nos momentos em que mais precisei.

Às professoras Dra. Kátia Livia Zambon e Ariane Scarelli pelo apoio e ajuda na formatação deste trabalho.

À professora Denís de Almeida Rosa Ribeiro, pela ajuda no summary.

Ao Tre, pela paciência e compreensão.

À todos que de alguma forma tornaram possível a conclusão deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	iv
RESUMO	vii
SUMMARY	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Fluidos	3
2.2. Fluidos newtonianos	4
2.3. Fluidos não-newtonianos	7
2.3.1. Fluidos não-newtonianos independentes do tempo	8
2.3.1.1. Fluidos não-newtonianos pseudoplásticos.....	8
2.3.1.2. Fluidos não-newtonianos pseudoplásticos com tensão inicial	10
2.3.1.3. Fluidos não-newtonianos Plástico de Bingham.....	10
2.3.1.4. Fluidos não-newtonianos dilatantes.....	11
2.3.1.5. Fluidos não-newtonianos dilatantes com tensão inicial	12
2.3.2. Fluidos não-newtonianos dependentes do tempo	13
2.3.2.1. Fluidos não-newtonianos tixotrópicos.....	13
2.3.1.2. Fluidos não-newtonianos reopéticos	14
2.3.3. Fluidos não-newtonianos viscoelásticos.....	14
2.4. Modelos Matemáticos	15
2.4.1. Fluidos newtonianos	15
2.4.2. Fluidos não-newtonianos independentes do tempo	15
2.4.2.1. Modelo para fluidos não newtonianos plástico de bingham.....	15
2.4.2.2. Modelo da Lei de Potência	16
2.4.2.3. Modelo de Casson	17
2.4.2.4. Modelo de Herschel-Bulkley.....	18
2.4.2.5. Modelo de Vocadlo	20
2.4.2.6. Modelo de Mizrahi e Berk.....	20
2.4.3. Fluidos dependentes do tempo	21
2.4.3.1. Modelo de Tiu e Boger.....	21

2.5. Tipos de Viscosímetros	27
2.5.1. Viscosímetros tipo tubo	27
2.5.1.1. Tubo	28
2.5.1.2. Capilar de alta pressão	28
2.5.1.3. Copo capilar	29
2.5.2. Viscosímetros rotacionais	29
2.5.2.1. Cilindros concêntricos	30
2.5.2.2. Cone e placa	30
2.5.2.3. Placas paralelas	31
2.5.2.4. Misturador/Sistema de Agitação	31
2.6. Impelidores	33
2.7. Potência consumida pelos Misturadores.	34
3. MATERIAL E MÉTODOS	38
3.1. Matéria-prima	38
3.2. Material	39
3.2.1. Misturador ou Sistema de Agitação	39
3.2.2. Viscosímetro rotacional Brookfield e acessórios	42
3.3. Métodos	44
3.3.1. As amostras	44
3.3.2. Obtenção dos dados com o viscosímetro rotacional Brookfield	44
3.3.3. Obtenção dos dados com o Sistema de Agitação	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO:	50
4.1. Caracterização reológica dos produtos usando o sistema de agitação	50
4.1.1. Verificação da dependência do tempo	50
4.1.1.1. Mel	51
4.1.1.2. Suco concentrado de pêssego	52
4.1.1.3. Suco concentrado de goiaba	53
4.1.1.4. Suco concentrado de laranja	54
4.1.2. Viscosidade em função da rotação	55
4.1.2.1. Mel	55
4.1.2.2. Suco concentrado de pêssego	56

4.1.2.3. Suco concentrado de goiaba	57
4.1.2.4. Suco concentrado de laranja	58
4.1.3. Determinação das constantes reológicas.	59
4.1.3.1. Mel.....	59
4.1.3.2. Suco concentrado de pêsego	60
4.1.3.3. Suco concentrado de goiaba	61
4.1.3.4. Suco concentrado de laranja	61
4.2. Determinação das constantes reológicas através do viscosímetro rotacional Brookfield.	64
4.2.1. Mel.....	64
4.2.2. Suco concentrado de pêsego.	66
4.2.3. Suco concentrado de goiaba.	67
4.2.4. Suco concentrado de laranja.	68
4.3. Comparação entre os resultados obtidos com o Sistema de Agitação e com o viscosímetro Brookfield.	69
4.4. Cálculo da Potência requerida no processo de mistura ou agitação :.....	71
5. CONCLUSÕES	73
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIAS	75
7. APÊNDICE	80
Anexo A - Medidas obtidas através do Sistema de Agitação utilizando a rampa de rotação da Figura 23.	80
Anexo B - Medidas obtidas através do Sistema de Agitação utilizando a rampa de rotação da Figura 22.	86
Anexo C - Medidas obtidas com viscosímetro rotacional Brookfield.....	93
Anexo D - Medidas das Potências e das Rotações obtidas através do Sistema de Agitação.	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos fluidos de acordo com o comportamento reológico.....	4
Figura 2 - Representação de um fluido sob a ação de uma força de cisalhamento.	5
Figura 3 - Curva de fluxo e de viscosidade de um fluido newtoniano.	7
Figura 4 - Curva de fluxo e viscosidade de um fluido não-newtoniano pseudoplástico.	9
Figura 5 – Curva de fluxo e de viscosidade de um fluido não newtoniano pseudoplástico com tensão inicial.	10
Figura 6 - Curva de fluxo de um fluido não-newtoniano plástico de bingham.	11
Figura 7 - Curva de fluxo e curva de viscosidade de fluidos não-newtonianos Dilatantes.....	12
Figura 8 - Curva de fluxo e curva de viscosidade de fluidos não-newtonianos dilatantes com tensão inicial.	12
Figura 9 – Curva de fluxo e curva de viscosidade de fluidos não-newtonianos tixotrópicos. ..	13
Figura 10 – Curva de fluxo e curva de viscosidade de fluidos não-newtonianos reopéticos.	14
Figura 11 – Tipos de viscosímetros tipo tubo e capilar.	28
Figura 12 – Tipos de viscosímetros rotacionais.	29
Figura 13 - Viscosímetro misturador com impelidor tipo pá, jaqueta com água para controle da temperatura e com indicação de componentes.	32
Figura 14 - (a) Sistema de Agitação ou Misturador; (b) Impelidor tipo âncora modificada.....	39
Figura 15 - Viscosímetro Rotacional Brookfield	42
Figura 16 - Sensor spindle LV – SC4-31.	43
Figura 17 - Exemplos de módulos.....	45
Figura 18 - Programa utilizado para obtenção dos dados reológicos.	46
Figura 19 – Ícone da viscosidade onde é fornecido o valor da viscosidade.....	47
Figura 20 - Rampa de velocidade com rotação crescente e decrescente.	48
Figura 21 - Rampa de velocidade com rotação de 0 a $2,5\text{ s}^{-1}$	49
Figura 22 – Gráfico do torque em função da rotação do impelidor obtidos com o sistema de agitação para o mel.....	51
Figura 23 - Gráfico do torque em função da rotação crescente e decrescente do impelidor obtidos com o sistema de agitação com o concentrado de pêssego.....	52

Figura 24 - Gráfico do torque em função da rotação do impelidor obtidos com o sistema de agitação com o suco concentrado de goiaba.....	53
Figura 25 – Gráfico do torque em função da rotação do impelidor obtidos com o sistema de agitação com o suco concentrado de laranja.	54
Figura 26 - Gráfico da viscosidade em função da rotação com o mel a 30°C - com a rampa de velocidade da Figura 20.....	55
Figura 27 - Gráfico da viscosidade em função da rotação do suco concentrado de pêssgo a 30°C - com a rampa de velocidade da Figura 20.....	56
Figura 28 - Gráfico da viscosidade em função da rotação do suco concentrado de goiaba a 30°C - com a rampa de velocidade da Figura 20.....	57
Figura 29 - Gráfico da viscosidade em função da rotação do suco concentrado de laranja a 30°C - com a rampa de velocidade da Figura 20.....	58
Figura 30 - Gráfico do logaritmo do troque em função do logaritmo da rotação do mel a 30°C.	59
Figura 31 - Gráfico do logaritmo do troque em função do logaritmo da rotação do suco concentrado de pêssgo (30°C).	60
Figura 32 - Gráfico do logaritmo do troque em função do logaritmo da rotação do suco concentrado da Goiaba a 30°C	61
Figura 33 – Gráfico do logaritmo do troque em função do logaritmo da rotação do suco concentrado de laranja a 30°C	62
Figura 34 - Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para o mel a 30°C.....	65
Figura 35 – Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação do suco concentrado de pêssgo a 30°C.	66
Figura 36 - Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação do suco concentrado de goiaba a 30°C.	67
Figura 37 - Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação do suco concentrado da Laranja a 30°C.....	68
Figura 38 - Valores experimentais da potência em relação à rotação para todos os produtos analisados	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelo Newtoniano, Lei da Potência, plásticos de Bingham como casos especiais do modelo de Herschel-Bulkley.	19
Tabela 2 - Modelos reológicos mais utilizados para descrever o comportamento de fluidos alimentícios.....	26
Tabela 3 - Dados referentes ao sistema de agitação ou misturador utilizado.....	41
Tabela 4 - Dados do recipiente do misturador que recebe o fluido a ser analisado.	41
Tabela 5 - Dimensões do impelidor tipo âncora modificada.....	42
Tabela 6 - Equações que relacionam o torque e rotação obtidas com o Sistema de Agitação ..	62
Tabela 7 - Índice de escoamento obtidos através do Sistema de Agitação	63
Tabela 8 - Valores de K_s obtidos através do Sistema de Agitação	63
Tabela 9 - Valores do índice de consistência (K) obtidos através do Sistema de Agitação ..	64
Tabela 10 - Valores experimentais de n e K para o mel.....	66
Tabela 11 - Valores experimentais de n e K para o suco concentrado de pêsego.	67
Tabela 12 - Valores experimentais de n e K para o suco concentrado de goiaba.	68
Tabela 13 - Valores experimentais de n e K para o suco concentrado de laranja.	69
Tabela 14 - Valores da viscosidade para o mel (produto newtoniano).	69
Tabela 15 - Valores do índice de escoamento dos produtos estudados obtidos com o Sistema de Agitação e o viscosímetro rotacional Brookfield.	70
Tabela 16 - Valores do índice de consistência dos produtos estudados obtidos com o Sistema de Agitação e o viscosímetro rotacional Brookfield.	70
Tabela 17 - Relação matemática da potência requerida em função da rotação.....	72

RESUMO

O conhecimento das propriedades reológicas é de grande importância no processamento, manuseio, controle de qualidade e desenvolvimento de diversos produtos. Determinar as propriedades de fluxo de produtos alimentícios é necessário para avaliar os efeitos dos diferentes métodos de processos ou de fatores como a potência requerida durante uma mistura, fornecendo subsídios à projetos de engenharia para o dimensionamento adequado de motores e bombas, que efetuem operação de mistura ou agitação com o mínimo de consumo de energia elétrica e a perda de carga em tubos de escoamentos. A concepção de um misturador ou sistema de agitação para fluidos passa necessariamente por uma análise reológica. Sendo os parâmetros empíricos como o índice de escoamento, o índice de consistência e a curva reológica dos alimentos, informações importantes no processamento e armazenamento de produtos alimentícios, este trabalho teve por objetivos: avaliar o uso de um misturador ou sistema de agitação Ika LR-2.ST com um agitador modelo Eurostar Power control-visc P7 acoplado a um impelidor do tipo âncora plana modificada e pela unidade de medida Ika Viscovlick VK 600 - na determinação das propriedades reológicas do mel de

abelhas, suco concentrado de pêssego, suco concentrado de laranja (sem adição de açúcar) e suco concentrado de goiaba; verificar o modelo matemático mais adequado ao comportamento de fluxo dos produtos analisados; calcular a potência requerida numa operação de agitação ou mistura. O equipamento utilizado para a obtenção dos resultados foi o Sistema de Agitação, devido a sua versatilidade em relação ao Viscosímetro Convencional, pois este permite a análise com amostras com um volume de até 2 litros, com fluidos em processos de reações químicas, a baixa pressão, entre outras características. Os parâmetros reológicos obtidos através do viscosímetro de cilindros concêntricos Brookfield com sensor LV - SC4-31, foram usados como padrão na comparação com os dados obtidos pelo sistema de agitação. A partir da análise dos reogramas, concluiu-se que o mel apresentou comportamento newtoniano; o suco concentrado de laranja um comportamento tixotrópico e os sucos concentrados de goiaba e de pêssego um comportamento pseudoplástico. O modelo matemático utilizado para a caracterização dos produtos analisados foi o modelo da Lei da Potência, $\tau = k \dot{\gamma}^n$. O índice de consistência obtido pelo sistema de agitação apresentou, em relação ao valor obtido pelo viscosímetro rotacional desvio percentual de 7,8 % para o mel; 5,8% para o suco concentrado de laranja sem adição de açúcar, 5,3 % para o suco concentrado e adoçado de goiaba e 0,0% para o suco concentrado e adoçado de pêssego. O índice de consistência obtido pelo sistema de agitação apresentou, em relação ao valor obtido pelo viscosímetro rotacional desvio percentual de 5,45% para o suco concentrado de Laranja, 5,8 % para o suco concentrado de goiaba e 0,0% para o suco concentrado de pêssego. O desvio percentual da viscosidade do mel foi de 1,6%. Com base nos erros obtidos conclui-se que o sistema de agitação é viável para a determinação das propriedades reológicas, dentro do intervalo de rotação usado. A potência requerida durante a operação foi calculada a partir do valor do torque e da rotação indicada pelo sistema de agitação usando a expressão $P = MN$. Todos os produtos apresentam a potência aumentando com o acréscimo da rotação. O mel apresentou o maior consumo de potência. O suco concentrado de goiaba e o suco concentrado de pêssego requereram potências muito próximas no processo de agitação. As potências determinadas experimentalmente foram: mel $P = 1,03N^{1,19}$, laranja: $P = 0,81N^{1,39}$, goiaba: $P = 0,56N^{1,44}$ e pêssego $P = 0,58N^{1,39}$.

VIABILITY OF USE OF A MIXER FOR THE ANALYSIS OF THE RHEOLOGICAL CHARACTERIZATION OF NUTRITIOUS PRODUCTS. Botucatu, 2007. 100 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho. – UNESP.

Author: FLÁVIA QUEIROZ COSTA

Adviser: JOSÉ ANGELO CAGNON

SUMMARY

The knowledge of the rheological properties is of great importance in the processing, handling, quality control and development of several products. The determination of the properties of flow of nutritious products is necessary to evaluate the effects of the different methods of processes or of factors as the potency requested during a mixture, supplying subsidies to engineering projects for the appropriate dimensioning of motors and bombs, that make mixture operation or agitation with the electric minimum of energy consumption and the load loss in tubes of drainages. A mixer's conception or agitation system for fluids necessarily goes by an rheological analysis. Being the empiric parameters as the drainage index, the consistence index and the rheological curve of the foods, important information in the processing and storage of nutritive products, this work has had for objectives: the validation of a mixer's use or agitation system - Ika LR-2.ST with an agitator Eurostar Power control-visc coupled P7 to an impelidor of plain anchor modified type and for the unit of measure Ika Viscovlick VK 600 - in the determination of the rheological properties of the honey of bees, concentrated juice of peach, concentrated juice of orange (without addition of sugar) and concentrated juice of guava; the verification of the more appropriate mathematical model to the behavior of flow of the analyzed products; the calculation of the requested potency in an agitation operation or mixes. The System of Agitation was used because he is much more versatile than a conventional viscometer because it allows the work with a sample volume of up to two liters, with fluids in processes of chemical reactions, the low pressure, among other characteristics The rheological parameters obtained through the viscometer of concentric cylinders Brookfield with sensor LV - SC4-31, were used as pattern in the comparison with the data obtained by the agitation system. Starting from the analysis of the rheogram, it was

ended that the honey presented newtonian behavior; the concentrated orange juice a thixotropic behavior and the concentrated guava and peach juices a pseudoplastic behavior. The mathematical model used for the characterization of the analyzed products was the potency law model. The consistence index obtained by the agitation system presented, in relation to the value obtained by the mixer viscometer statistical error of 7.8% for the honey; 5.8% for the concentrated orange juice, 5.3% for the concentrated guava juice and 0.0% for the concentrated peach juice. The consistence index obtained by the agitation system presented, in relation to the value obtained by the viscometer statistical error of 5.5% for the concentrated orange juice, 5.8% for the concentrated guava juice and 0.0% for the concentrated peach juice. The statistical error of the viscosity of the honey was of 1.6%. With base in the obtained statistical error is ended that the agitation system is viable for the determination of the rheological properties, inside of the rotation interval which was used. The requested potency during the operation was calculated starting from the value of the torque and of the suitable rotation for the agitation system using the expression $P=M.N$. All of the products present the potency increasing with the increment of the rotation. The honey presented the largest potency consumption. The concentrated guava juice and the concentrated peach juice requested very close potencies in the agitation process. The certain potencies experimentally were: honey: $P = 1.03N^{1.19}$, orange: $P = 0.81N^{1.40}$, guava: $P = 0.56N^{1.44}$ and peach: $P = 0.58N^{1.39}$.

Key words: mixer, rheologie, requested potency.

1. INTRODUÇÃO

Os alimentos, além de oferecerem aroma, cor e sabor característicos, exibem um determinado comportamento mecânico; reagem de um certo modo quando tentamos deformá-los. Para expressar ou estimar seu comportamento mecânico, segundo Muller (1973) existem dois procedimentos: um deles, chamado Método Sensorial, que consiste em tocar, morder ou mastigar o alimento e descobrir as sensações observadas e varia amplamente de um indivíduo a outro. O segundo procedimento utiliza métodos físicos; nesse caso, a característica estudada não depende do indivíduo que a efetua, pois é realizada instrumentalmente. Esse estudo físico do comportamento mecânico dos materiais é chamado reologia.

Diferentes campos da ciência como geologia e mineração, tecnologia de concreto, mecânica dos solos, processamento de plásticos, polímeros e seus componentes, escoamento de tintas e dispersão de pigmentos, sangue, bioengenharia, cosméticos, utilizam o conhecimento das propriedades reológicas dos fluidos. Em produtos alimentícios, a viscosidade e a consistência são parâmetros que podem determinar a aceitação ou não do produto pelo consumidor.

Nas indústrias, as propriedades de fluxo podem ser utilizadas para definir projetos de equipamentos com desempenho melhor e com um menor consumo de energia.

A concepção de um misturador ou sistema de agitação para fluidos não-newtonianos passa necessariamente por uma análise reológica. Uma vez determinado o reograma e o tipo de fluido, verifica-se o valor do índice de escoamento e do índice de consistência do fluido.

De acordo com Rao (1999), viscosímetros do tipo misturador são usados nas indústrias de alimentos para caracterização do comportamento de fluidos dependentes do tempo e de fluidos com partículas grandes ou de substâncias que apresentam problemas com sedimentação de partículas.

Sendo os parâmetros empíricos como a viscosidade e a curva reológica dos alimentos, informações importantes no processamento e armazenamento de produtos alimentícios, este trabalho teve como objetivos:

- avaliar o uso de um misturador na determinação das propriedades reológicas do mel de abelhas, do suco concentrado de laranja (sem adição de açúcar), do suco concentrado de pêsego e do suco concentrado de goiaba; a 30°C.
- verificar o modelo matemático mais adequado ao comportamento de fluxo dos produtos analisados;
- calcular a potência requerida em uma operação de agitação ou mistura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fluidos

Segundo Street e Vennard (1978), o desejo do homem por conhecimentos sobre fluidos começou com seus problemas em navegação, irrigação, abastecimento de água entre outros.

A definição do estado fluido pode ser feita levando-se em conta a ação de diversos tipos de tensão. Os fluidos possuem propriedades elásticas somente sob compressão ou tensão direta. A aplicação de uma tensão de cisalhamento infinitesimal em um fluido resulta em uma deformação contínua e permanente (Street e Vennard, 1978).

De acordo com Street e Vennard (1978), a habilidade do fluido em mudar sua forma ou fluir ocorre devido a característica dos fluidos não resistirem a tensão de cisalhamento.

Os fluidos podem ser classificados, segundo Silva (2000), com base no seu comportamento reológico em dois grandes grupos: fluidos newtonianos e fluidos não newtonianos, como mostra a Figura 1.

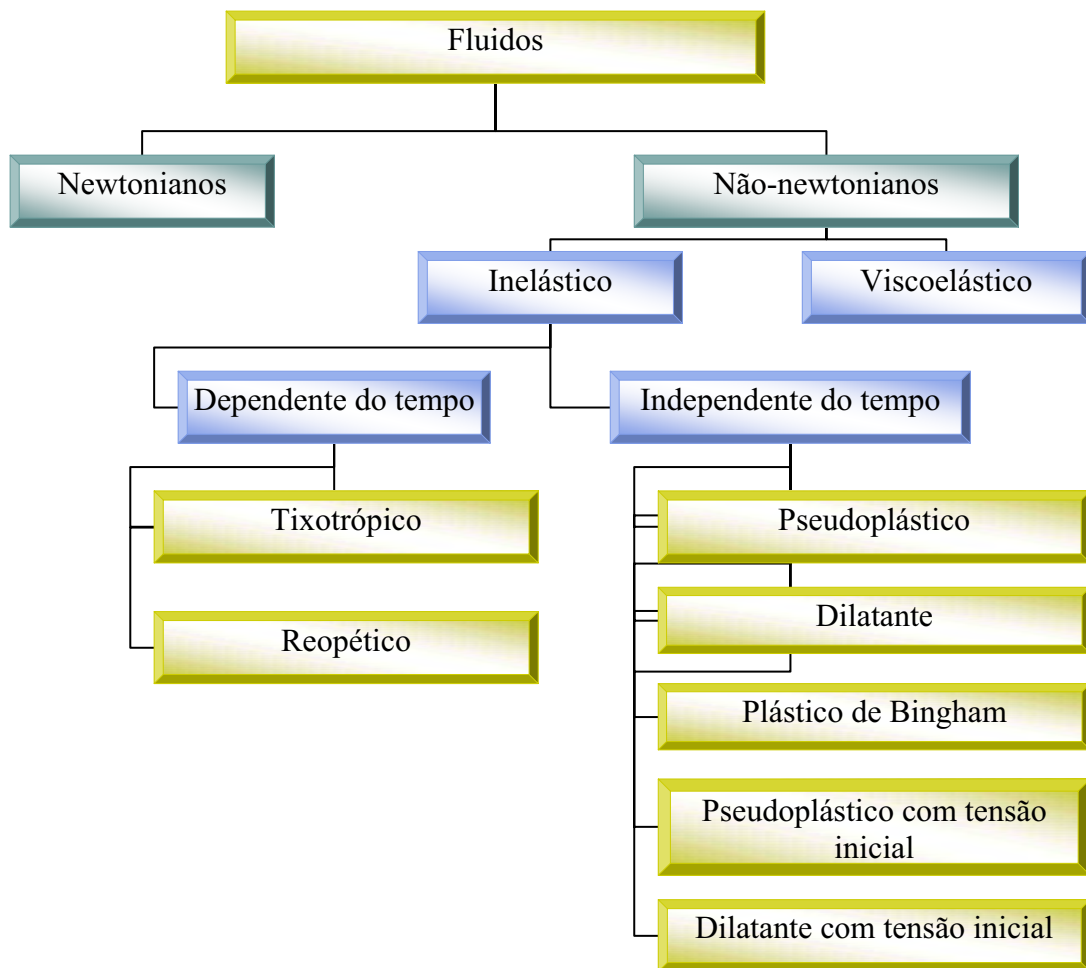


Figura 1 - Classificação dos fluidos de acordo com o comportamento reológico.

Fonte: Silva (2000).

2.2. Fluidos newtonianos

Um fluido newtoniano caracteriza-se por possuir viscosidade absoluta constante, independentemente da variação da taxa de deformação (Schramm,2006).

Isaac Newton utilizou o modelo da Figura 2 para definir viscosidade pela primeira vez. Entre as duas laminais paralelas de área A , separadas pela distância (y) existe um fluido. Ao se aplicar uma força tangencial (F) sobre a lâmina superior, mantendo

fixa a inferior, cada partícula do fluido percorre uma trajetória paralela às lâminas e com velocidade constante. No entanto, as velocidades das diversas partículas variam de v (junto à lâmina superior), até zero (junto à lâmina inferior). A distribuição da velocidade é linear ao longo de y e o gradiente de velocidade (dv/dy), é diretamente proporcional a força tangencial (F) por unidade de área, como demonstra a equação:

$$\frac{F}{A} = \mu \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad (1)$$

onde:

F = força, N, newton (Kg.m/s^2);

A = área, (m^2);

μ = viscosidade do fluido, Pa.s, pascal.segundo (Kg/m.s);

dv/dy = gradiente de velocidade, (1/s).

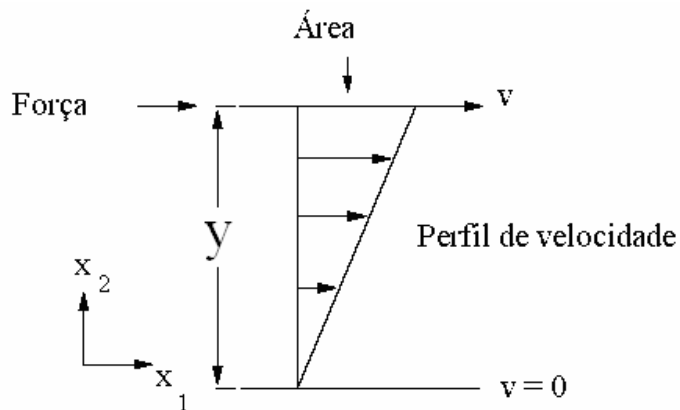


Figura 2 - Representação de um fluido sob a ação de uma força de cisalhamento.

Fonte: Steffe (1992).

O gradiente de velocidade descreve o cisalhamento que ocorre entre as várias camadas de fluidos, uma em relação às outras, por isso ele é chamado de taxa de deformação ou de deformação angular ($\dot{\gamma}$) e a força tangencial sobre a área é a própria tensão cisalhante (τ). Assim a expressão de Newton é escrita por:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

onde:

τ = tensão de cisalhamento, Pa, pascal (N/m^2);

μ = viscosidade do fluido, Pa.s, pascal.segundo (Kg/m.s).

$$\dot{\gamma} = \text{taxa de deformação} \left(\frac{\frac{m}{s}}{m} = (1/s) \right);$$

A viscosidade, do ponto de vista microscópico, pode ser entendida como um processo de transferência de impulso entre camadas vizinhas de fluido, animadas de velocidades diferentes, causada pela agitação molecular (Bird *et al.*, 1960).

A equação (2) é chamada de Lei da Viscosidade de Newton e os fluidos que se comportam desta forma são chamados de fluidos newtonianos.

Os fluidos newtonianos apresentam uma relação linear entre o gradiente de velocidade ou a taxa de deformação ($\frac{dv}{dy}$) e a tensão cisalhante (τ), isto é, a viscosidade é constante ou independente da taxa de deformação, como mostra a Figura 3.

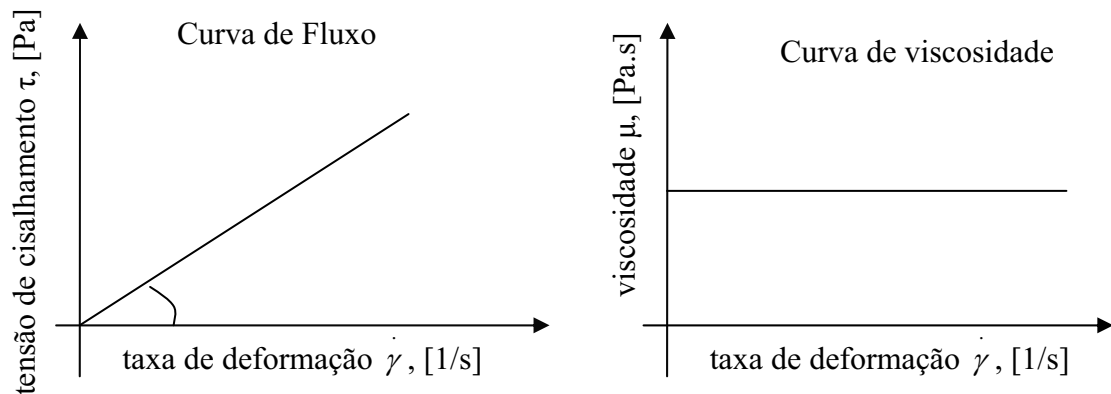


Figura 3 - Curva de fluxo e de viscosidade de um fluido newtoniano.

Fonte: Schramm (2006).

Como exemplos de fluidos newtonianos temos a água (Steffe, 1992), mel (Steffe, 1992), azeite de oliva (Muller, 1973), açúcar invertido (Gratão *et al.*, 2004), leite (Muller, 1973), entre outros.

2.3. Fluidos não-newtonianos

Quando o fluido não obedece a Lei da Viscosidade de Newton, a viscosidade (μ) é denominada viscosidade aparente (μ_a). Para fluidos não-newtonianos, segundo Rao (1999), a viscosidade aparente pode ser calculada a uma dada taxa de deformação, podendo usar a expressão:

$$\mu_a = f\left(\dot{\gamma}\right) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3)$$

onde:

μ_a = viscosidade aparente, Pa.s, pascal.segundo (Kg/ms).

τ = tensão de cisalhamento, Pa, pascal (N/m^2);

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação ($\frac{m}{s} = (1/s)$);

De acordo com Fryer *et al.* (1997), os fluidos não-newtonianos são divididos de acordo com seu escoamento em três grupos:

- fluidos independente do tempo: a viscosidade aparente independe da duração da deformação;
- fluidos dependentes do tempo: a viscosidade aparente varia com o tempo da deformação mas não apresenta um comportamento elástico;
- viscoelástico: o fluido exibe algumas características de líquidos viscosos e sólidos elásticos.

2.3.1. Fluidos não-newtonianos independentes do tempo

2.3.1.1. Fluidos não-newtonianos pseudoplásticos

Para esses fluidos, o comportamento de fluxo varia com a taxa de deformação e a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de deformação como mostram as curvas da Figura 4. Segundo Schramm (2006), isto ocorre, pois vários líquidos que aparentam ser homogêneos na verdade são compostos por diversas partículas que quando em repouso, mantêm uma ordem interna irregular que lhes fornece a característica de uma alta viscosidade. Com o aumento da tensão de cisalhamento, essas partículas podem se orientar, se estirar ou se deformar na direção do fluxo ou ainda, induzir a quebra de agregados o que faz com que esse líquido escoe mais facilmente.

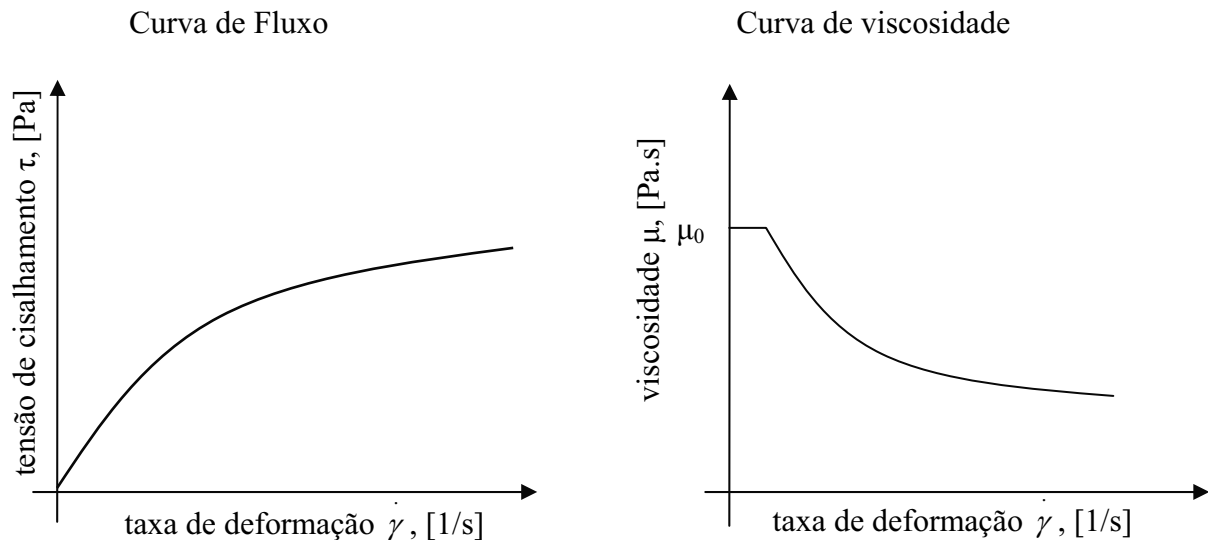


Figura 4 - Curva de fluxo e viscosidade de um fluido não-newtoniano pseudoplástico.

Fonte: Schramm (2006).

Segundo Muller (1973) e Schramm (2006), a maioria dos líquidos pseudoplásticos retornam a sua estrutura inicial quando a tensão de cisalhamento é reduzida ou interrompida.

Para Schramm (2006) o comportamento de fluxo pseudoplástico não é uniforme ao longo das faixas de cisalhamentos. Com uma baixa taxa de deformação, o movimento Browniano das moléculas mantém as partículas ou moléculas dispersas aleatoriamente apresentando uma viscosidade inicial (μ_0) independente da faixa de cisalhamento. Quando a taxa de deformação aumenta a ponto de exceder o efeito aleatório do movimento browniano, a viscosidade cai significativamente até que, para altas taxas de cisalhamento, a viscosidade se aproxima a um valor constante μ_1 .

Como exemplos têm-se, o purê de banana (Steffe, 1992), concentrados de laranja (Steffe, 1992), patês de carne (Muller 1973), suco de maçã (Steffe, 1992), entre outros.

2.3.1.2. Fluidos não-newtonianos pseudoplásticos com tensão inicial

Alguns fluidos pseudoplásticos requerem uma tensão inicial, denominada de tensão limite de escoamento, para que comece a escoar. Como mostra a Figura 5. Após iniciado o escoamento o fluido se comporta como pseudoplástico. (Steffe,1992).

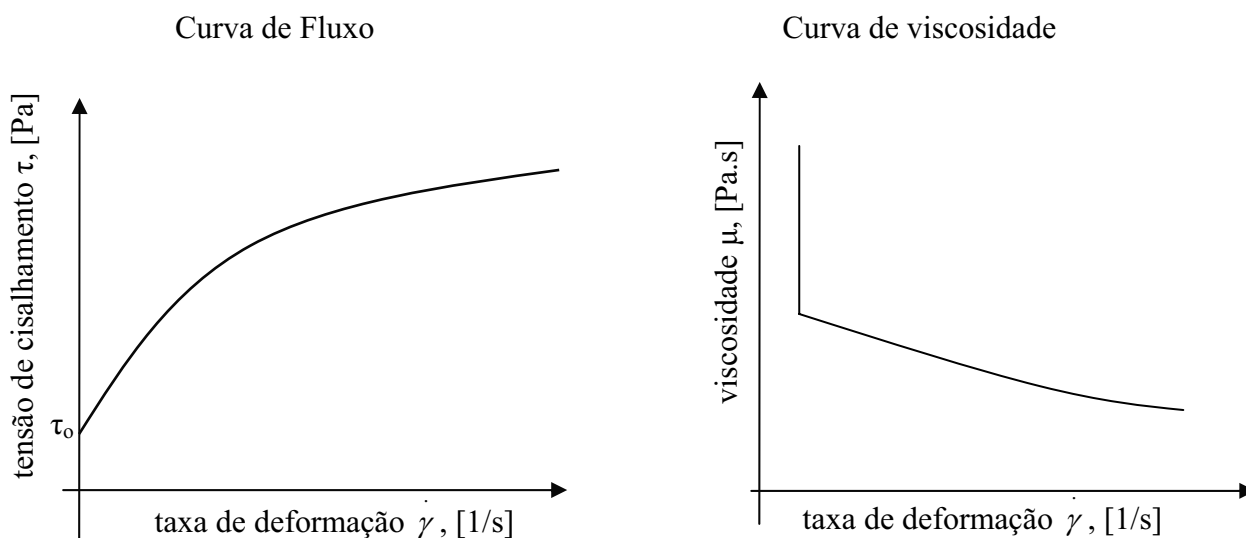


Figura 5 – Curva de fluxo e de viscosidade de um fluido não newtoniano pseudoplástico com tensão inicial.

Fonte: Schramm (2006).

Como exemplo temos: massas para batom (Schramm, 2006), pasta de dente (Steffe, 1992), maionese (Muller, 1973), entre outros.

2.3.1.3. Fluidos não-newtonianos Plástico de Bingham

Alguns fluidos têm a característica de apresentar uma relação linear para a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, como mostra a Figura 6. Porém é necessária uma tensão de escoamento (τ_0) inicial para provocar o início do fluxo.

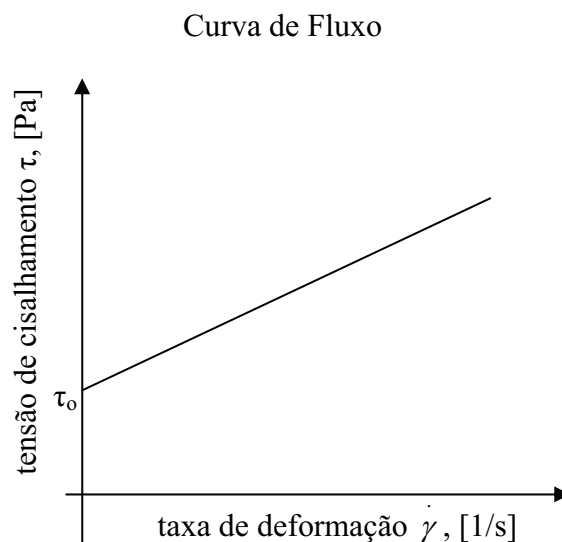


Figura 6 - Curva de fluxo de um fluido não-newtoniano plástico de bingham.

Fonte: Schramm (2006).

Como exemplos temos: pastas dentifícias (Steffe, 1992), pasta de tomate (Steffe, 1992), graxas (Muller, 1973), entre outros.

2.3.1.4. Fluidos não-newtonianos dilatantes

De acordo com Rao (1975), nos fluidos dilatantes, a viscosidade aparente aumenta com o aumento da taxa de deformação. O comportamento de fluxo dilatante é raro em líquidos porém ocorre em partículas sólidas como em emulsões de PVC com plastificantes para formar o plastissol (Schramm, 2006), em alguns tipos de mel (Steffe, 1992), em solução a 40% de goma de milho crua (Steffe, 1992).

O reograma de fluxo para esses fluidos está mostrado na Figura 7.

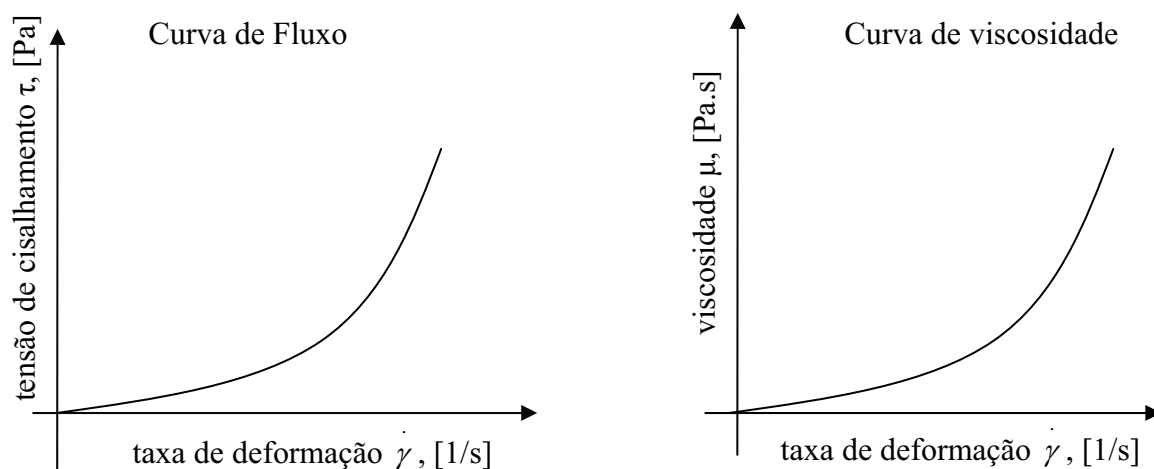


Figura 7 - Curva de fluxo e curva de viscosidade de fluidos não-newtonianos Dilatantes.

Fonte: Schramm (2006).

2.3.1.5. Fluidos não-newtonianos dilatantes com tensão inicial

Alguns fluidos dilatantes requerem uma tensão inicial, denominada de tensão limite de escoamento, para que o fluido comece a escoar, como mostra a Figura 8. Após iniciado o escoamento o fluido se comporta como dilatante. (Steffe,1992)

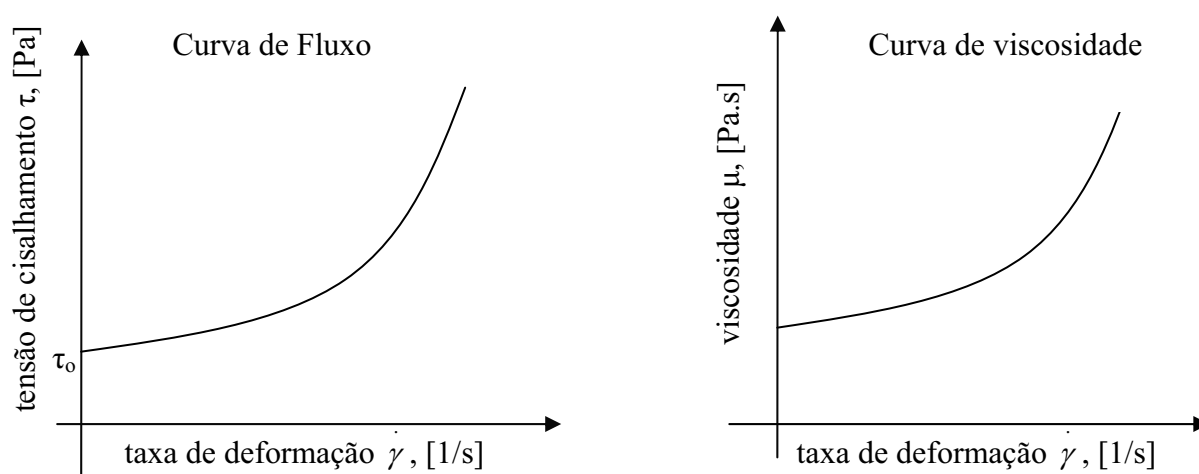


Figura 8 - Curva de fluxo e curva de viscosidade de fluidos não-newtonianos dilatantes com tensão inicial.

Fonte: Schramm (2006).

2.3.2. Fluidos não-newtonianos dependentes do tempo

2.3.2.1. Fluidos não-newtonianos tixotrópicos

Um fluido tixotrópico apresenta um comportamento similar ao pseudoplástico onde a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de deformação, porém a diminuição da viscosidade aparente não está relacionada exclusivamente com a taxa de deformação mas sim com o tempo. Mantendo constante a taxa de deformação, a viscosidade aparente diminui com o passar do tempo (Muller, 1973).

De acordo com Muller (1973), Steffe (1992) e Rao (1999); o reograma de fluxo para o fluido tixotrópico é obtido aumentando a taxa de deformação com valores definidos até um valor máximo e voltando às taxas de deformações iniciais, indicada pela Figura 9. Assim é possível observar que a curva superior não se sobrepõe à inferior.

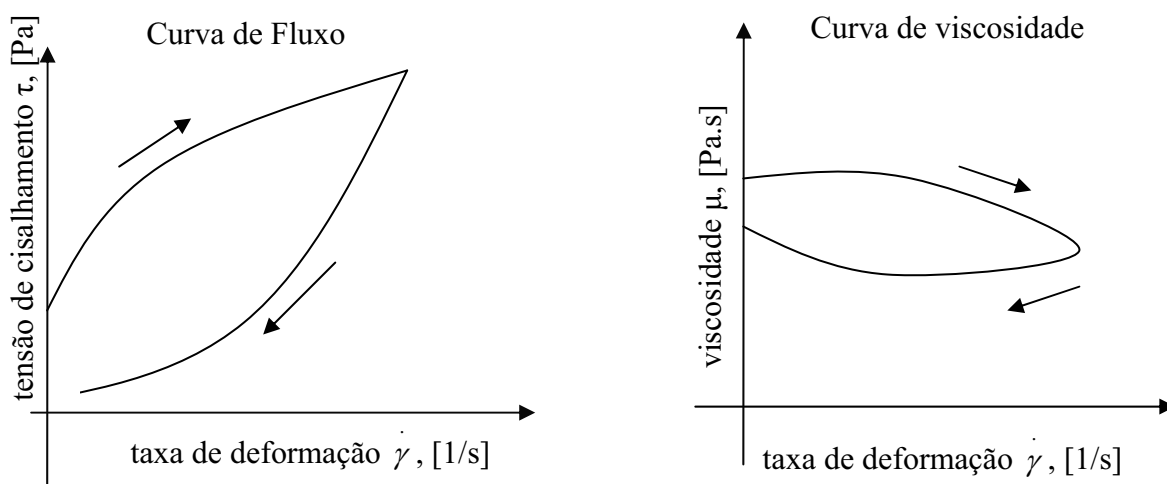


Figura 9 – Curva de fluxo e curva de viscosidade de fluidos não-newtonianos tixotrópicos.

Fonte: Muller (1973).

Têm-se como exemplos as tintas e xaropes (Schramn, 2006), sucos de maçã com polpa (Steffe, 1992), margarinas (Butler and McNulty, 1995), entre outros.

2.3.1.2. Fluidos não-newtonianos reopéticos

Um fluido reopético tem por característica o aumento da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação, porém esse aumento não está relacionado exclusivamente com a taxa de deformação mas sim com o tempo pois mantendo constante a taxa de deformação, a viscosidade aparente aumenta com o passar do tempo (Muller, 1973).

A Figura 10 mostra o comportamento de fluxo para esses fluidos.

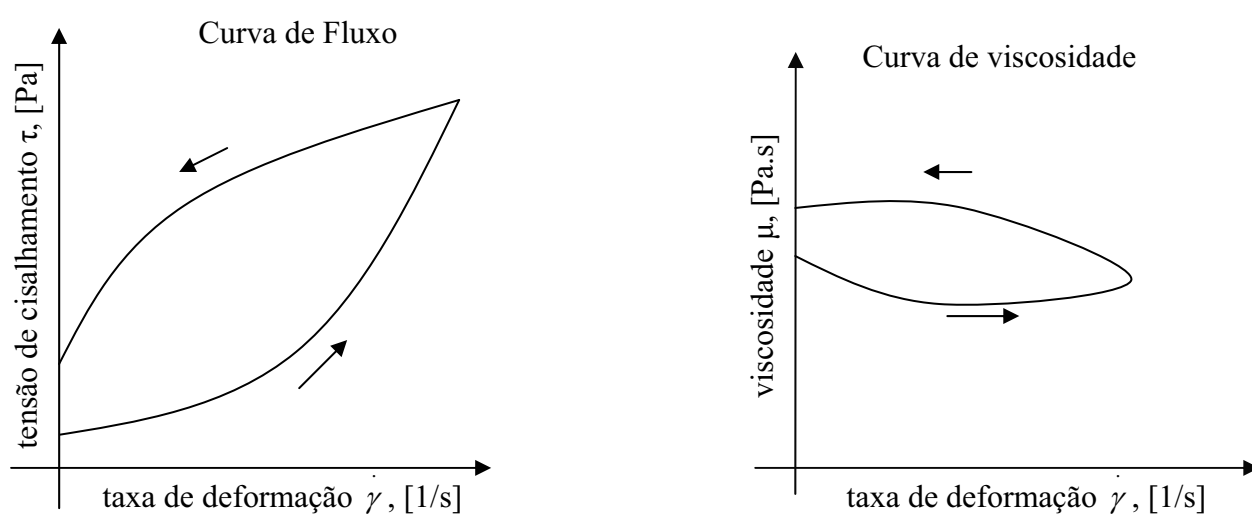


Figura 10 – Curva de fluxo e curva de viscosidade de fluidos não-newtonianos reopéticos.

Fonte: Muller (1973).

2.3.3. Fluidos não-newtonianos viscoelásticos

Existem fluidos que exibem características de sólidos. São os chamados viscoelásticos. Os fluidos viscoelásticos são substâncias que apresentam propriedades viscosas e elásticas acopladas. Quando cessa a tensão de cisalhamento ocorre uma certa recuperação da deformação. Exemplo: massas de farinha de trigo (Steffe, 1992).

2.4. Modelos Matemáticos

Segundo Rao (1999), os modelos matemáticos são utilizados para descrever dados reológicos como: tensão de cisalhamento, taxa de deformação e viscosidade, que são explicitados através de gráficos chamados de reogramas. Através da relação entre os dados reológicos podemos calcular os parâmetros reológicos que são: o coeficiente de consistência e o índice de escoamento.

2.4.1. Fluidos newtonianos

O modelo matemático que descreve o comportamento de um fluxo newtoniano é dado pela equação (2).

2.4.2. Fluidos não-newtonianos independentes do tempo

2.4.2.1. Modelo para fluidos não newtonianos plástico de bingham

De acordo com Steffe (1992), os plásticos de Bingham apresentam um comportamento semelhante ao fluido newtoniano onde apenas é necessário uma tensão de cisalhamento inicial para iniciar o escoamento. Temos:

$$\tau - \tau_0 = \mu' \dot{\gamma} \quad (4)$$

onde:

τ = tensão de cisalhamento, Pa, pascal (N/m^2);

τ_0 = tensão de cisalhamento inicial, Pa, pascal (N/m^2);

μ' = viscosidade plástica de Bingham Pas, pascal segundo (Kg/m.s);

$$\dot{\gamma} = \text{taxa de deformação} \left(\frac{\frac{m}{s}}{m} = (1/s) \right).$$

2.4.2.2. Modelo da Lei de Potência

O modelo da lei de potência, segundo Rao (1999), é utilizado para caracterizar produtos alimentícios pois é aplicado para valores de taxa de deformação de até 10^4 s^{-1} que podem ser obtidos por muitos viscosímetros comerciais.

Esse modelo descreve a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação e é representado pela equação:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

onde:

τ = tensão de cisalhamento, Pa, pascal (N/m^2);

K = índice de consistência, (Pa.s^n);

$$\dot{\gamma} = \text{taxa de deformação} \left(\frac{\frac{m}{s}}{m} = (1/s) \right).$$

n = índice de escoamento;

Para:

- $n = 1$, o índice de consistência é igual a viscosidade do fluido;
- $0 < n < 1$ o fluido é pseudoplástico;
- $n > 1$ o fluido é dilatante.

Linearizando a equação (5), ou seja, usando o logaritmo em ambos os lados da equação temos:

$$\log \tau = \log K + n \log \dot{\gamma} \quad (6)$$

Os parâmetros K e n são obtidos através da equação da reta obtida onde n é o coeficiente angular da reta e logaritmo K é o linear.

Para fluidos não-newtonianos, segundo Tanner (1985), utilizando a lei da potência, é possível relacionar a viscosidade aparente em termos do índice de consistência e do índice de escoamento:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = K (\dot{\gamma})^{n-1} \quad (7)$$

onde:

μ_a = viscosidade aparente Pa.s, pascal segundo (Kg/ms),

τ = tensão de cisalhamento, Pa, pascal (N/m²);

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação, 1/s;

K = índice de consistência, (Pa.sⁿ);

n = índice de escoamento.

2.4.2.3. Modelo de Casson

Esse modelo é representado pela expressão:

$$\tau^{0,5} = K_{0c} + K_c \left(\dot{\gamma} \right)^{0,5} \quad (8)$$

onde:

τ = tensão de cisalhamento, Pa, pascal (N/m^2);

K_{0c} = índice de consistência inicial de casson, (Pa.s^n);

K_c = índice de consistência de casson, (Pa.s^n).

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação, 1/s;

K_{0c} é o coeficiente linear da reta e K_c o coeficiente angular.

A tensão de cisalhamento inicial é calculada por $(K_{0c})^2$ e a viscosidade plástica de Casson por $(K_c)^2$ (Rao e Cooley, 1983).

O “Interational Office of Cocoa and Chocolate” adotou este modelo para descrever o escoamento do chocolate (Steffe, 1992).

Para concentrados de laranja e tomate sob baixa taxa de deformação, de acordo com Rao *et al.* (1981) esse modelo não se ajusta à curva de fluxo.

2.4.2.4. Modelo de Herschel-Bulkley

Segundo Steffe (1992), este modelo representado pela equação (9) é muito usado para produtos alimentícios pseudoplásticos e dilatantes com tensão inicial:

$$\tau - \tau_0 = K \left(\dot{\gamma} \right)^n \quad (9)$$

onde:

τ = tensão de cisalhamento, Pa, pascal (N/m^2);

τ_0 = tensão de cisalhamento inicial, Pa, pascal (N/m^2);

K = índice de consistência, (Pa.s^n).

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação, (1/s);

n = índice de escoamento;

Para Rao (1999), se a tensão inicial do fluido é conhecida, K e n são determinados pela regressão linear do $\log(\tau - \tau_0)$ em relação $\log \dot{\gamma}$, onde K é o coeficiente linear da reta e n , o coeficiente angular.

Segundo Steffe (1992), este modelo é usado para produtos alimentícios pois ele é uma generalização de vários modelos matemáticos conforme os valores de K , n e $\dot{\gamma}$ apresentados pela Tabela 1.

Tabela 1 - Modelo Newtoniano, Lei da Potência, plásticos de Bingham como casos especiais do modelo de Herschel-Bulkley.

Modelo do Fluido	K (Pa.s ⁿ)	n	τ_0 (N/m ²)
Newtoniano	> 0	1	0
Pseudoplástico	> 0	$0 < n < 1$	0
Dilatante	> 0	$0 < n < \infty$	0
Plástico de Bingham	> 0	1	> 0
Herschel- Bulkley	> 0	$0 < n < \infty$	> 0

Fonte: Steffe (1992).

2.4.2.5. Modelo de Vocadlo

Foi elaborado para fluidos viscoelásticos:

$$\tau = \left[\left(\tau_0 \right)^{\frac{1}{n_v}} + k_v \dot{\gamma} \right]^{n_v} \quad (10)$$

onde:

τ = tensão de cisalhamento, Pa, pascal (N/m²);

τ_0 = tensão de cisalhamento inicial, Pa, pascal (N/m²);

n_v = índice de escoamento de Vocadlo;

k_v = índice de consistência de Vocadlo, (Pa.sⁿ);

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação, 1/s.

Os valores de k_v e n_v são determinados experimentalmente.

2.4.2.6. Modelo de Mizrahi e Berk

Este modelo é uma variação do modelo de Casson. Foi elaborado através da análise de uma determinada suspensão em fluidos não-newtonianos. O modelo de Misrahi e Berk (1972) é expresso pela equação:

$$\tau^{0,5} = K_{0_M} + K_M \left(\dot{\gamma} \right)^{n_M} \quad (11)$$

onde:

τ = tensão de cisalhamento, Pa, pascal (N/m²);

K_{0_M} = índice de consistência inicial de Mizrahi, (Pa.sⁿ);

K_M = índice de consistência de Mizrahi, (Pa.sⁿ);

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação, (1/s);

n_M = índice de escoamento de Mizrahi.

2.4.3. Fluidos dependentes do tempo

Cheng e Evans (1965), ao analisar fluidos tixotrópicos, verificaram que a viscosidade é função da taxa de deformação e com o parâmetro estrutural dependente do tempo.

$$\tau = \mu_a \left(\lambda, \dot{\gamma} \right) \dot{\gamma} \quad (12)$$

logo:

$$\frac{d\lambda}{dt} = f \left(\lambda, \dot{\gamma} \right) \quad (13)$$

τ = tensão de cisalhamento, Pa, pascal (N/m²);

μ_a = viscosidade aparente Pa.s, pascal segundo (Kg/ms);

λ = parâmetro estrutural de dependência do tempo.

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação, 1/s;

2.4.3.1. Modelo de Tiu e Boger

Tiu e Boger (1974) utilizaram os trabalhos de Cheng e Evans simplificando a teoria estrutural por eles proposta utilizando o modelo de Herschel e Bulkley e adicionando um parâmetro estrutural:

$$\tau = \lambda \left(\tau_0 + K_H \dot{\gamma}^{n_H} \right) \quad (14)$$

onde:

τ = tensão de cisalhamento, Pa, pascal (N/m²);

λ = parâmetro estrutural de Tiu e Borges;

τ_0 = tensão de cisalhamento inicial, Pa, pascal (N/m²);

K_H = índice de consistência inicial de Herschel, (Pa.sⁿ);

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação, (1/s).

n_H = índice de escoamento de Herschel;

Barnes *et al.* (1985) sugeriram a retirada do termo que representa a tensão inicial pois, com exceção de poucas situações, a tensão de cisalhamento inicial não existe, isto é, a viscosidade é sempre finita. Então, a equação (14) re-escrita de acordo com o modelo da Lei da Potência é:

$$\tau = \lambda K \dot{\gamma}^n \quad (15)$$

onde:

τ = tensão de cisalhamento, Pa, pascal (N/m²);

λ = parâmetro estrutural;

K = índice de consistência, (Pa.sⁿ);

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação, (1/s).

Para a equação do parâmetro estrutural em função do tempo, Tiu e Boger (1974) utilizaram uma equação de segunda ordem desenvolvida por Petrellis e Flumerfield, (1973), que é expressa por:

$$\frac{d\lambda}{dt} = -K_1 (\lambda - \lambda_e)^2 \quad (16)$$

O parâmetro estrutural (λ) varia do valor 1 para o tempo zero até um valor de equilíbrio do parâmetro estrutural (λ_e) que é menor que 1. A constante (K_1) é uma função da taxa de deformação e é determinada experimentalmente.

Para a validação da equação (16) deve-se obter um bom ajuste da reta ($R^2 \cong 1$).

Para Butler e McNulty (1995) a caracterização reológica completa de um alimento é feita por meio das equações (15) e (16), onde as constantes K , n , K_1 e λ_e são determinadas experimentalmente. As constantes K e n podem ser determinadas nas condições de tempo zero, onde o parâmetro estrutural é igual a 1 e a equação (15) reverte para o modelo da Lei da Potência.

A viscosidade aparente instantânea para qualquer fluido é definida através da equação (7).

Combinando as equações (9) e (14), tem-se a equação (17).

$$\lambda = \frac{\mu_a \dot{\gamma}}{\tau_0 + K_H \dot{\gamma}^{n_H}} \quad (17)$$

onde:

λ = parâmetro estrutural de Tiu e Borges;

μ_a = viscosidade aparente Pa.s, pascal segundo (Kg/ms);

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação, (1/s);

τ_0 = tensão de cisalhamento inicial, Pa, pascal (N/m²);

K_H = índice de consistência de Herschel, (Pa.sⁿ);

n_H = índice de escoamento de Herschel.

Considerando $\tau_0 = 0$ a equação (17) pode ser reescrita como:

$$\lambda = \frac{\mu_a \dot{\gamma}}{K \dot{\gamma}^n} \quad (18)$$

onde:

λ = parâmetro estrutural de Tiu e Borges;

μ_a = viscosidade aparente Pa.s, pascal segundo (Kg/ms);

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação, (1/s);

K = índice de consistência, (Pa.sⁿ);

n = índice de escoamento.

As equações (17) e (18) também são válidas para as condições iniciais e de equilíbrio, substituindo λ por λ_0 , μ_a por μ_{a0} , e λ_e e μ_{ae} .

Substituindo a equação (18) na (16) e após ser integrada, tem-se a equação (19).

$$\frac{1}{\mu_a - \mu_{ae}} = \frac{1}{\mu_{a0} - \mu_{ae}} + \left(\frac{K_1 \dot{\gamma}}{\tau_0 + K_H \dot{\gamma}^{n_H}} \right) t \quad (19)$$

onde:

μ_a = viscosidade aparente, Pa.s, pascal segundo (Kg/ms);

μ_{ae} = viscosidade aparente estrutural, Pa.s, pascal.segundo (Kg/ms);

μ_{a0} = viscosidade aparente inicial, Pa.s, pascal.segundo (Kg/ms);

K_1 = índice de consistência, (Pa.sⁿ);

$\dot{\gamma}$ = taxa de deformação, (1/s);

t = tempo, segundos(s)

τ_0 = tensão de cisalhamento inicial, Pa, pascal (N/m²);

K_H = índice de consistência de Herschel, (Pa.sⁿ);

n_H = índice de escoamento de Herschel.

onde

$$a_1 = \frac{K_1 \dot{\gamma}}{\tau_0 + K_H \dot{\gamma}^{n_H}} \quad (20)$$

Para uma determinada taxa de deformação, o gráfico de $\left[\frac{1}{\mu_a - \mu_{ae}} \right]$ em função do tempo (t) produz uma reta cujo coeficiente angular corresponde a a_1 . Repetindo o mesmo procedimento para outros valores da taxa de deformação estabelecemos a relação entre a_1 e $\dot{\gamma}$ então K_1 é determinado pela equação (20).

Coutinho (2003), apresentou a Tabela 2 que apresenta os modelos reológicos mais usados para descrever o comportamento de fluidos alimentícios.

Tabela 2 - Modelos reológicos mais utilizados para descrever o comportamento de fluidos alimentícios.

Modelo	Equação	Utilização
lei da potência	$\tau = K \dot{\gamma}^n$	projetos de engenharia.
Herschel-Bulkley	$\tau - \tau_0 = K \left(\dot{\gamma} \right)^n$	projetos de engenharia quando há a necessidade de conhecer a tensão inicial do produto.
Casson	$\tau^{0,5} = K_{0c} + K_c \left(\dot{\gamma} \right)^{0,5}$	para alimentos com partículas em suspensão em meios newtonianos.
Mizrahi e Berk	$\tau^{0,5} = K_{0M} + K_M \left(\dot{\gamma} \right)^{n_M}$	para alimentos com partículas em suspensão em solventes pseudoplásticos.
Vocadlo	$\tau = \left[\left(\tau_0 \right)^{\frac{1}{n_v}} + k_v \dot{\gamma} \right]^{n_v}$	para produtos viscoplásticos.
Tiu e Boger (modelo da lei da potência modificado)	$\tau = \lambda K \dot{\gamma}^n$	para fluido dependente do tempo quando deseja-se determinar o parâmetro estrutural da dependência do tempo.

Fonte: Coutinho (2003).

2.5. Tipos de Viscosímetros

Segundo Steffe (1992), há um grande número de viscosímetros comerciais para serem escolhidos de acordo com a sua geometria, as faixas de viscosidades e as taxas de cisalhamento necessárias para o trabalho ou estudo. Os critérios para a escolha devem envolver, principalmente;

- a natureza do material;
- se é de baixa ou alta viscosidade;
- se é elástico ou não;
- a dependência da temperatura na viscosidade.

Outra importante consideração é a precisão e exatidão requeridas e se as medidas são para controle de qualidade ou para pesquisa.

A maioria dos viscosímetros disponíveis no mercado, que estão incorporados em ensaios padrão de muitas indústrias, em vez de descrever a viscosidade ou a tensão de cisalhamento, abrangendo uma ampla faixa de taxas de cisalhamento, somente produz um único ponto na curva de comportamento reológico, sendo os restantes desconhecidos. Tal procedimento não traz conseqüências para fluidos newtonianos porque a viscosidade é independente da taxa de deformação mas pode ser danoso para fluidos não-newtonianos (Steffe, 1992).

De acordo com Steffe (1992), há dois tipos principais de viscosímetros: capilares/tubo e rotacionais.

2.5.1. Viscosímetros tipo tubo

De acordo com Steffe (1992), são divididos em três tipos básicos como mostra o esquema da Figura 11. A principal diferença entre os viscosímetros capilares e de tubo é o diâmetro. Todos necessitam de uma pressão para iniciar o escoamento. São utilizados para caracterizar fluidos independentes com o tempo.

Segundo Schramm (2006), são projetados para medir a viscosidade e não as propriedades elásticas.

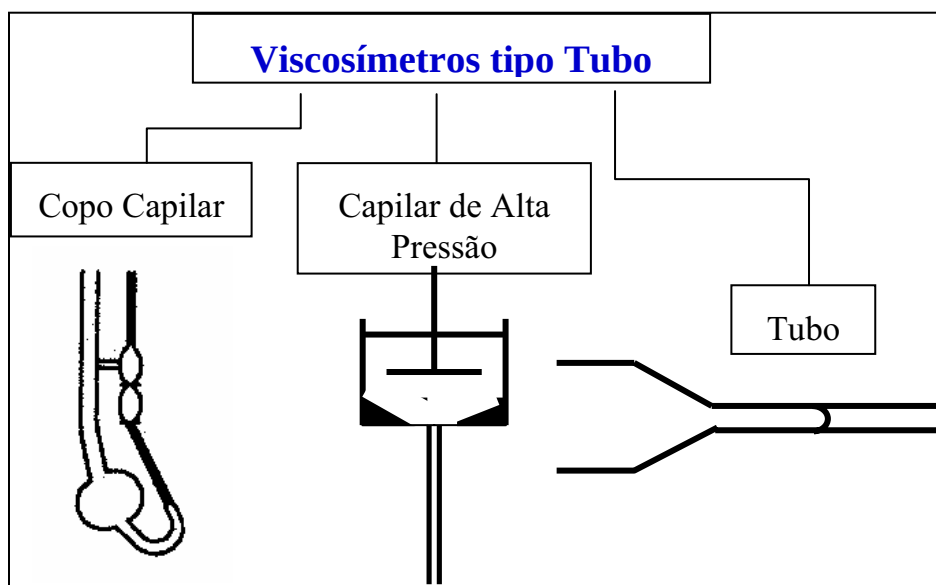


Figura 11 – Tipos de viscosímetros tipo tubo e capilar.

Fonte: Steffe (1992).

2.5.1.1. Tubo

As medições de viscosidade são obtidas por meio da pressão necessária para produzir o escoamento do fluido. Deve ser projetado de modo que a queda de pressão em relação do comprimento do tubo e a vazão volumétrica, corresponda a um escoamento laminar (Steffe, 1992).

2.5.1.2. Capilar de alta pressão

Um pistão, uma extrusora ou outra fonte de pressão força o fluido através de um capilar retangular, a uma taxa de fluxo constante ou programada e, através da variação da pressão entre dois pontos do capilar, da vazão e da densidade do fluido, determina-se a viscosidade (Schramm, 2006).

Segundo Schramm (2006), a principal aplicação desse viscosímetro é na medição da viscosidade de polímeros fundidos.

2.5.1.3. Copo capilar

Segundo Schramm (2006), este viscosímetro difere do viscosímetro capilar de alta pressão pelo fato que a amostra de fluido escoar pelo tubo capilar apenas devido seu próprio peso. Para a medida da viscosidade é necessário determinar o tempo necessário para que certa quantidade de fluido passe através do tubo capilar.

São excelentes viscosímetros para líquidos newtonianos de baixa ou média viscosidade.

2.5.2. Viscosímetros rotacionais

Os viscosímetros rotacionais, segundo Steffe (1992), são constituídos de duas partes básicas: cilindro externo (copo) e cilindro interno (chamado de sensor ou rotor) separados pelo fluido que está sendo analisado

Segundo Schramm (2006), as partes podem ser de cilindros concêntricos (copo e rotor), de placas, de cone e placa, de discos ou pás (Figura 12).

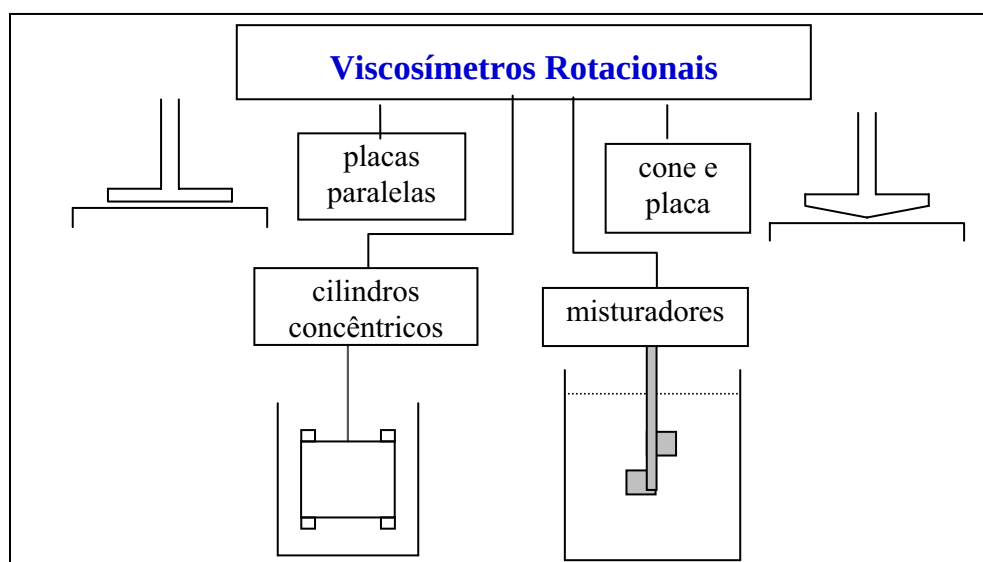


Figura 12 – Tipos de viscosímetros rotacionais.

Fonte : Steffe (1992)

Nesses viscosímetros, um dos cilindros gira em relação ao outro ou ambos os cilindros giram, produzindo cisalhamento no fluido. A viscosidade é medida em função do torque exigido para produzir uma determinada velocidade angular ou da velocidade angular necessária para produzir um determinado torque. Eles são mais versáteis que os de fluxo capilar e podem ser usados para fluidos não-newtonianos, quer seja dependente do tempo ou não.

2.5.2.1. Cilindros concêntricos

Segundo Steffe (1992) um cilindro é colocado concentricamente dentro do copo que contém o fluido a ser analisado. O cilindro gira enquanto o copo permanece estacionário e a resistência do fluido ao movimento é medida através do torque.

De acordo com Schramm (2006), a velocidade do rotor e a deformação são medidos através de um sensor óptico que divide os giros por 360° em um milhão de partes, o que torna possível detectar variações do rotor em ângulos extremamente pequenos. Os sensores são projetados de tal forma que os valores do torque possam ser transformados matematicamente em tensão de cisalhamento. A velocidade do rotor em taxa de cisalhamento e através desses valores é possível a obtenção dos valores da viscosidade.

Vários viscosímetros rotacionais estão disponíveis no mercado dentre eles o viscosímetro rotacional Brookfield.

Segundo Steffe (1992), para que este tipo de viscosímetro apresente um bom desempenho, o escoamento deve ser laminar e constante.

2.5.2.2. Cone e placa

Os viscosímetros do tipo cone e placa operam com taxas de deformações moderadas. *“O cilindro interno – rotor- é movimentado por um motor enquanto o outro cilindro – copo – é fixo e envolvido por um preciso controle de temperatura da amostra. O movimento do cilindro força o fluido presente no espaçamento angular entre os cilindros a fluir. A resistência do fluido cisalhado resulta em um torque , relacionado a*

viscosidade, sobre o cilindro interno que contraria o torque produzido pelo motor, de forma a manter sua velocidade. Um detector de torque – normalmente uma mola que se “curva” como resultado de torque aplicado - é colocado entre o motor e a haste do cilindro interno. A deformação da “mola de torque” é diretamente proporcional à medida da viscosidade da amostra. As “molas de torque” são “dobradas” em ângulos de $0,5^\circ$. (Schramm, 2006).

Os viscosímetros do tipo Cone e Placa fornecem os dados de tensão de cisalhamento, taxa de deformação e viscosidade. Através da análise gráfica desses dados obtêm-se os parâmetros reológicos da amostra estudada (Rao, 1999).

De acordo com Steffe (1992), fluidos com partículas grandes não são indicados para este equipamento pois o ângulo do cone é pequeno (menor que 5°).

2.5.2.3. Placas paralelas

De acordo com Rao (1999) e Schramm (2006), esses viscosímetros apresentam dois discos de raios r separados por uma abertura. O princípio de obtenção dos dados reológicos é o mesmo dos viscosímetros cone e placa. A abertura h , entre as placas, pode acomodar fluidos com partículas grandes.

2.5.2.4. Misturador/Sistema de Agitação

Os Misturadores, segundo Steffe (1992), são muito usados na indústria de alimentos para a avaliação do comportamento de fluidos dependentes com o tempo, com partículas grandes ou substâncias que apresentam problemas com sedimentação das partículas. Fornecem, através do programa computacional do viscosímetro, os dados de rotação, torque e viscosidade. Com a análise gráfica desses dados obtemos os parâmetros reológicos da amostra estudada.

Segundo Rao (1999), alguns viscosímetros rotacionais utilizam um disco rotativo, uma barra, uma âncora ou uma pá, chamada de impelidor, que gira imersa ao fluido.

O impelidor é movimentado por um motor enquanto o copo é fixo e envolvido por um preciso controle de temperatura da amostra. O movimento do cilindro força o fluido presente no espaçamento angular entre os cilindros a fluir. A resistência do fluido cisalhado resulta em um torque, relacionado à viscosidade, sobre o cilindro interno que contraria o torque produzido pelo motor, de forma a manter sua velocidade. Um detector de torque, normalmente uma mola que se “curva” como resultado de torque aplicado ou um sensor óptico, é colocado entre o motor e a haste do cilindro interno. (Schramm, 2006).

De acordo com Steffe (1992), esse viscosímetro, como mostra a Figura 13, é útil na indústria de alimentos para a avaliação do comportamento de fluidos dependentes do tempo e de fluidos com partículas grandes ou substâncias que apresentam problemas com sedimentação de partículas.

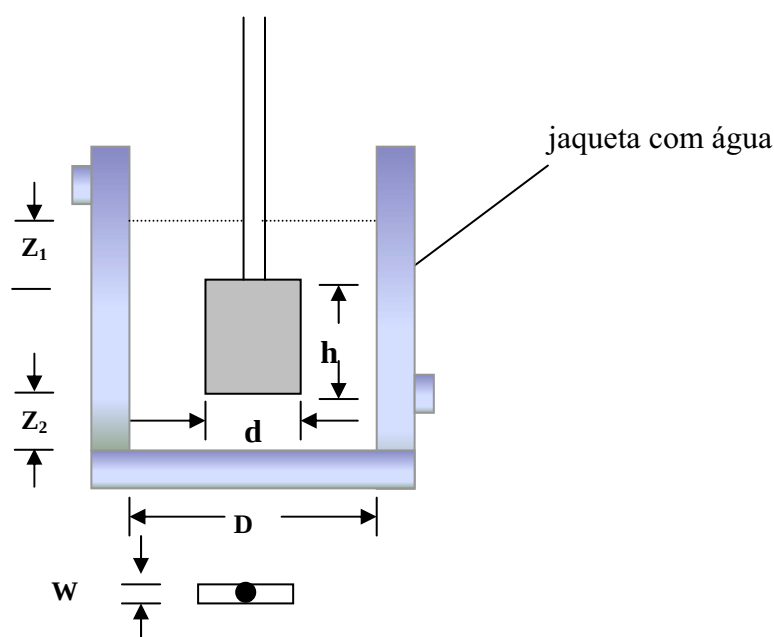


Figura 13 - Viscosímetro misturador com impelidor tipo pá, jaqueta com água para controle da temperatura e com indicação de componentes.

Fonte: Steffe (1992).

onde:

Z_1 distância entre a superfície do fluido e o início do impelidor, metros (m);

Z_2 distância entre o final do impelidor e o fundo do tanque, metros (m);

h - a altura do impelidor, metros (m);

D - diâmetro do tanque, metros (m);

d - diâmetro do impelidor, metros (m);

W - espessura do impelidor, metros (m).

Sistemas de agitação ou misturadores, segundo Rao (1999), são mecanismos capazes de produzir o movimento da massa do fluido contida em um tanque de mistura para diversas finalidades como a transferência de massa em sistemas heterogêneos, mistura de líquidos, agitação, formação de emulsões, transferência de calor e uniformização de temperatura e mistura de reagentes em um reator.

Densidade específica, a viscosidade do fluido, a temperatura de operação, a geometria do tanque e a intensidade de agitação, são fatores importantes na determinação do melhor sistema de agitação para efetuar uma dessas operações. (Steffe, 1992).

Segundo Rao (1999), os viscosímetros misturadores são utilizados em alimentos complexos, como por exemplo: mostarda, chocolate fundido, molho de maçã, sucos concentrados e outras suspensões, para minimizar os efeitos da sedimentação e da separação de produtos.

Muitos são os métodos utilizados para produzir o movimento de fluidos dentro de tanques. O mais comum deles utiliza os impelidores rotativos cujos principais tipos são hélice naval, turbinas de fluxo radial e pás planas.

2.6. Impelidores

Segundo Ho & Kwong (1974), a escolha de um impelidor é baseada principalmente na viscosidade do fluido:

- hélices, quando a viscosidade é inferior a 3,0 Pa.s;
- turbinas, quando a viscosidade está entre 3,0 e 5,0 Pa.s;
- pás, quando a viscosidade está entre 50,0 Pa.s e 90,0 Pa.s;
- pás modificadas (âncoras, helicoidal e parafuso helicoidal) quando a viscosidade está entre 90,0 Pa.s e 1.000,0 Pa.s;
- “Z-blade” ou “Sigma-blade”, quando a viscosidade for superior a 1.000,0 Pa.s.

2.7. Potência consumida pelos Misturadores.

Metzner & Otto (1957), utilizaram um misturador para determinar a potência consumida durante a mistura de um produto. Esta técnica é baseada na suposição de que a média da taxa de deformação $\left(\dot{\gamma}_m\right)$ ao redor do impelidor é diretamente proporcional à rotação (N) .

$$\dot{\gamma}_m = k_s N \quad (21)$$

onde:

$\dot{\gamma}_m$ = média da taxa de deformação, (1/s);

k_s = constante de proporcionalidade definida experimentalmente e é obtida a partir das características físicas do impelidor e do índice de escoamento do fluido agitado;

N = rotação, (1/s).

Substituindo a equação (22) na (7) obtêm-se a viscosidade aparente para fluidos que obedecem à lei da potência, que é expressa pela equação.

$$\mu_a = K (k_s N)^{n-1} \quad (22)$$

onde:

μ_a = viscosidade aparente, Pa.s, pascal segundo (Kg/ms);

k_s = constante de proporcionalidade definida experimentalmente e é obtida a partir das características físicas do impelidor e do índice de escoamento do fluido agitado;

N = rotação, (1/s);

n = índice de escoamento.

Segundo Rao (1999) o valor de k_s para o impelidor tipo âncora pode ser obtido pela equação (23):

$$k_s = \left[37 - \left(1 - \frac{d}{D} \right) \right] (1 - n) \quad (23)$$

onde:

d = diâmetro interno do impelidor tipo âncora modificada;

D = diâmetro externo da âncora impelidor tipo âncora modificada;

n = índice de escoamento do fluido analisado.

De acordo com Riger e Novak (1973), a constante k_s pode ser determinada pelo gráfico $(1-n)$ na abscissa e $\log_{10} \left[P / (K N^{n+1} d^3) \right]$ na ordenada. O teste deve ser conduzido de modo que os valores da P , N , d e os parâmetros reológicos K e n da lei da potência sejam obtidos para cada impelidor utilizado no processo.

Segundo Perez e Steffe (1990), para rotações abaixo de 20 rpm a variação de k_s é pequena e acima desta rotação k_s aumenta rapidamente com a rotação.

Para Steffe (1992), o índice de escoamento (n) pode ser determinado pela inclinação da reta do logaritmo do torque (M) em função do logaritmo da rotação (N).

O índice de consistência (K) de um fluido no qual desejamos determinar, representado pelo índice y e chamado de fluido de teste, segundo Rao (1999),

pode ser obtido através do uso de um fluido adotado como padrão (representado pelo índice x) onde são conhecidos seus parâmetros reológicos (n e K) e o torque obtido para cada rotação utilizada em sua agitação. A equação (24) relaciona os valores do torque e rotação com os parâmetros reológicos de ambos os fluidos (padrão e o de teste):

$$\frac{M_x}{M_y} = \frac{\tau_x}{\tau_y} = \frac{K_x (K_s N_x)^{n_x}}{K_y (K_s N_y)^{n_y}} \quad (24)$$

onde:

M_x e M_y = torque obtido com o fluido teste y e o padrão x , ($\text{Kg.m}^2/\text{s}^2$);

τ_x e τ_y = tensão de cisalhamento obtido com o fluido teste y e o padrão x , (Pa), (N/m^2);

K_x e K_y = índice de consistência dos fluidos teste y e o padrão x , (Pa.s^n);

K_s = constante de proporcionalidade da equação (23) é função das características geométricas do impelidor e o índice de escoamento do fluido analisado.

N_x e N_y = rotação do impelidor com o fluido teste y e o padrão x , (1/s);

n_x e n_y = índice de escoamento dos fluidos teste y e o padrão x .

Para $n_x \approx n_y$, em uma mesma rotação mantendo o mesmo impelidor, com os fluidos teste e padrão, temos a equação (25) simplificada:

$$\frac{M_x}{M_y} = \frac{K_x}{K_y} \quad (25)$$

onde: M_x , M_y e K_x são conhecidos.

O cálculo da potência experimental, segundo Steffe (1992), foi determinado pelo torque e pela rotação do sistema de agitação:

$$P_{\text{exp.}} = M N \quad (26)$$

onde:

P_{exp} = potência experimental, N.m/s;

M = torque, N.m;

N = rotação, 1/s.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Matéria-prima

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

- Mel adquirido diretamente do produtor.
- Suco concentrado de laranja, sem adição de açúcar.
- Preparado líquido para refresco de goiaba concentrado e adoçado.
- Preparado líquido para refresco de pêssego concentrado e adoçado.

A amostra do mel foi estocada à temperatura ambiente e os concentrados de frutas, a -14°C, até a utilização nos ensaios.

3.2. Material

3.2.1. Misturador ou Sistema de Agitação

O misturador ou o sistema de agitação analisado é um Misturador IKA® LR-2.ST encontra-se na Central de Laboratórios de Pesquisas da UNESP – Bauru. É composto por um agitador Eurostar Power control-visc P7 acoplado a um impelidor do tipo âncora plana modificada e por uma unidade de medida modelo Ika Viscovlick VK 600, como mostra a Figura 14, itens a e b.



(a)



(b)

Figura 14 - (a) Sistema de Agitação ou Misturador; (b) Impelidor tipo âncora modificada

O Misturador IKA® LR-2.ST é um sistema de agitação que agrega funções de um viscosímetro misturador e de um reator.

Como viscosímetro foi planejado e designado para fornecer os dados de torque, rotação e a viscosidade instantânea do fluido.

Como reator, simula e otimiza misturas de fluidos durante processos de reações químicas e processos de dispersões e homogeneizações de fluidos em um recipiente que apresenta um volume máximo de 2L.

O recipiente de reator pode ser aquecido até 230 °C e pode ser utilizado em vácuo de até 25 mbar.

Opera com um volume máximo de fluido de 2,0 L. Em operação de mistura, o volume mínimo é de 0,5 L e em operação de dispersão, o volume mínimo é 0,8 L.

O sistema é ligado a um programa computacional Labworldsoft, para registrar os dados de forma automática, fazer gráficos e tabelas eliminando erros operacionais e de registros. Fornece instantaneamente as curvas de fluxo, de viscosidade, rotação e torque.

A unidade de medida IKA Viscoclick é um instrumento extremamente sensível e funciona como medidor de torque para agitadores laboratoriais. O valor do torque e as mudanças em seu valor podem ser obtidos durante a operação de agitação ou mistura. Fornece medidas de torque de até 3,8 N.m. Os valores do torque e da rotação fornecidos pelo sistema de agitação são registrados pelo programa computacional e processados com outros parâmetros pré-determinados que incluem o tamanho e forma do vaso e do impelidor e a densidade do meio a uma determinada temperatura.

O sistema de agitação atinge um torque máximo de 4,05 N.m e a rotação varia de 0 a 4,833 rps. O tempo de coleta de dados é definido pelo operador do sistema com medidas múltiplas em escala de ms (mili-segundos).

O vaso de agitação tem uma jaqueta de condicionamento térmico, com circulação externa para um banho termostático que mantém a temperatura de trabalho definida pelo operador e indicada por um termopar imerso na amostra.

O impelidor é do tipo âncora modificada por apresentar orifícios em sua superfície para favorecer o processo de mistura.

Os dados referentes à geometria do sistema de agitação, do recipiente e do impelidor utilizados podem ser observados nas Tabelas 3, 4 e 5.

Tabela 3 - Dados referentes ao sistema de agitação ou misturador utilizado.

Volume mínimo de fluido.	[L]	0,5
Volume máximo de fluido.	[L]	2,0
Temperatura máxima de trabalho	[°C]	230
Pressão máxima	[bar]	1
Vácuo	[mbar]	25
Viscosidade máxima.	[mPas]	150000
Faixa de rotação	[1/s]	0,13 – 4,83
Passo de giro do telescópio	[mm]	390
Dimensões (W x H x D)	[mm]	460 x 1240 x 430
Peso	[kg]	25
Temperatura do ambiente	[°C]	5 - 40
Mistura relativa possível	[%]	80
Diferença de potencial	[V]	230
Frequência da rede elétrica	[Hz]	50/60
Potência do motor	[W]	130

Tabela 4 - Dados do recipiente do misturador que recebe o fluido a ser analisado.

Volume útil	(L)	2
Diâmetro interno	(mm)	150
Altura do costado	(mm)	210
Superfície de troca térmica	-----	Jaqueta
Impelidor	-----	Âncora plana

Tabela 5 - Dimensões do impelidor tipo âncora modificada.

Diâmetro	(mm)	140
Altura	(mm)	126
d/D	-----	0,93
$c = (D - d)/2$	(mm)	5

3.2.2. Viscosímetro rotacional Brookfield e acessórios

O viscosímetro rotacional Brookfield modelo LVDV-II + mostrado na Figura 15, encontra-se no Centro de Estudos de Raízes e Amidos Tropicais – CERAT – UNESp – Botucatu. É um viscosímetro rotacional, que efetua medidas do torque percentual, da tensão de cisalhamento, da viscosidade e da taxa de deformação e é acoplado a um programa computacional para coleta e processamento dos dados.

**Figura 15** - Viscosímetro Rotacional Brookfield

Esse viscosímetro rotacional é composto por um sistema de medição do torque através de uma mola calibrada e por vários sensores de cisalhamento definidos de acordo com a viscosidade do produto a ser usado. O princípio de medida é dado pela rotação do sensor que está imerso no fluido. O arraste viscoso da amostra contra o sensor é medido pela deflexão da mola que está presa, em um dos seus lados, na transmissão do motor e no outro lado, ao eixo principal onde estão conectados os sensores de cisalhamento.

A temperatura das amostras analisadas é mantida constante por um sistema de banho termostático.

A velocidade do cilindro interno varia de 0,01 1/s a 3,33 1/s e os limites de viscosidade variam de 0,015 Pa.s a 2.000,00 Pa.s, dependendo do tipo do sensor.

Os sensores ou adaptadores disponíveis para este modelo são: LV Spindle; Termosel e adaptadores para pequenas amostras UL; DIM; Spiral e Barras-T

Foi utilizado nos ensaios realizados o sensor LV - SC4-31, como mostra a Figura 16, pois esse sensor forneceu as medidas realizadas.



Figura 16 - Sensor spindle LV – SC4-31.

3.3. Métodos

3.3.1. As amostras

Os fluidos analisados foram: água, o mel de abelhas, suco concentrado de laranja sem adição de açúcar, suco concentrado de goiaba e suco concentrado de pêssgo. Todas na temperatura de 30°C.

3.3.2. Obtenção dos dados com o viscosímetro rotacional Brookfield

As amostras foram colocadas no recipiente de condicionamento do viscosímetro rotacional Brookfield no volume indicado pelo fabricante de 30 mL e mantidas em banho térmico para manter a temperatura de ensaio. Os ensaios foram feitos a 30°C e em triplicatas.

Os dados foram coletados em intervalos de tempos de 30 segundos.

Inicialmente definiu-se a rampa de velocidade de acordo com a sensibilidade de leitura do sensor para cada amostra. Os dados foram fornecidos através do programa computacional do viscosímetro rotacional Brookfield Wingather v2. Os dados obtidos foram trabalhados pelo programa computacional Excel 2003.

O viscosímetro rotacional Brookfield fornece os dados da tensão de cisalhamento, taxa de deformação e viscosidade do fluido cisalhado.

Os valores calculados estão nas Tabelas C₁, C₂, C₃ e C₄ do Anexo C.

Os dados obtidos através do viscosímetro rotacional Brookfield foram considerados padrão para posterior comparação com o Sistema de Agitação ou Misturador.

3.3.3. Obtenção dos dados com o Sistema de Agitação

O sistema de agitação operou sem as amostras durante 30 minutos para a lubrificação dos mancais e estabilização do torque.

As amostras de mel, suco concentrado de laranja, suco concentrado de goiaba e suco concentrado de pêssgo a 30°C foram colocadas, separadamente, O volume de fluido usado foi de 2 L. Os dados foram coletados em intervalos de tempo de 60 segundos. Os ensaios foram feitos a 30°C e em triplicatas.

Foram definidos no programa computacional Labworldsoft a rotação, o tempo de operação e o tipo de impelidor. Os dados obtidos foram processados utilizando os programas computacionais Excel 2003 e Labworldsoft.

O equipamento é comandado pelo programa computacional Labworldsoft que é totalmente programado pelo operador que utiliza as funções fornecidas pelo equipamento.

O programa fornece módulos com as funções possíveis de serem utilizadas ou fornecidas pelo equipamento. A Figura 17 mostra exemplos de módulos com as cores indicativas de categoria. Cada módulo é representado através de ícones e são mostrados com cores diferentes que indicam a categoria a que pertencem. Módulos azuis representam dispositivos de laboratório que estão fisicamente presentes (*hardware*). Módulos amarelos são usados para operações de aritmética e derivar valores comuns. Módulos vermelhos são usados para controle manual e automático dos dispositivos - os módulos utilizados para controle e tarefas de tempo também pertencem a este grupo. Módulos verdes são usados para visualização dos valores numéricos obtidos ou exibição gráfica de valores medidos e armazenar estes valores em formato *lws* (formato do Labworld) ou *txt* (código de ASCII) o que torna possível o processamento dos dados em outros programas computacionais.

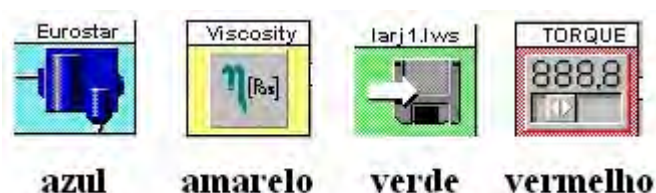


Figura 17 - Exemplos de módulos.

Fonte: Labwordsoft

O programador escolhe, conforme lhe é conveniente, os módulos a serem utilizados na operação do equipamento e os interliga de maneira coerente. A interligação é mostrada através de “setas”.

O “Eurostar”, indicado pelo módulo azul, é o corpo do equipamento, onde está o motor.

O tipo de impelidor usado é informado, segundo os dados do fabricante, através de sua classificação numérica fornecida pelo fabricante ao programa computacional através da seleção do módulo do “eurostar”.

O “viscoklick” é um acessório externo ao “eurostar” necessário para que o equipamento forneça os dados da viscosidade instantânea e do torque do fluido a ser analisado.

A Figura 18 mostra o esquema básico do programa computacional usado nos ensaios.

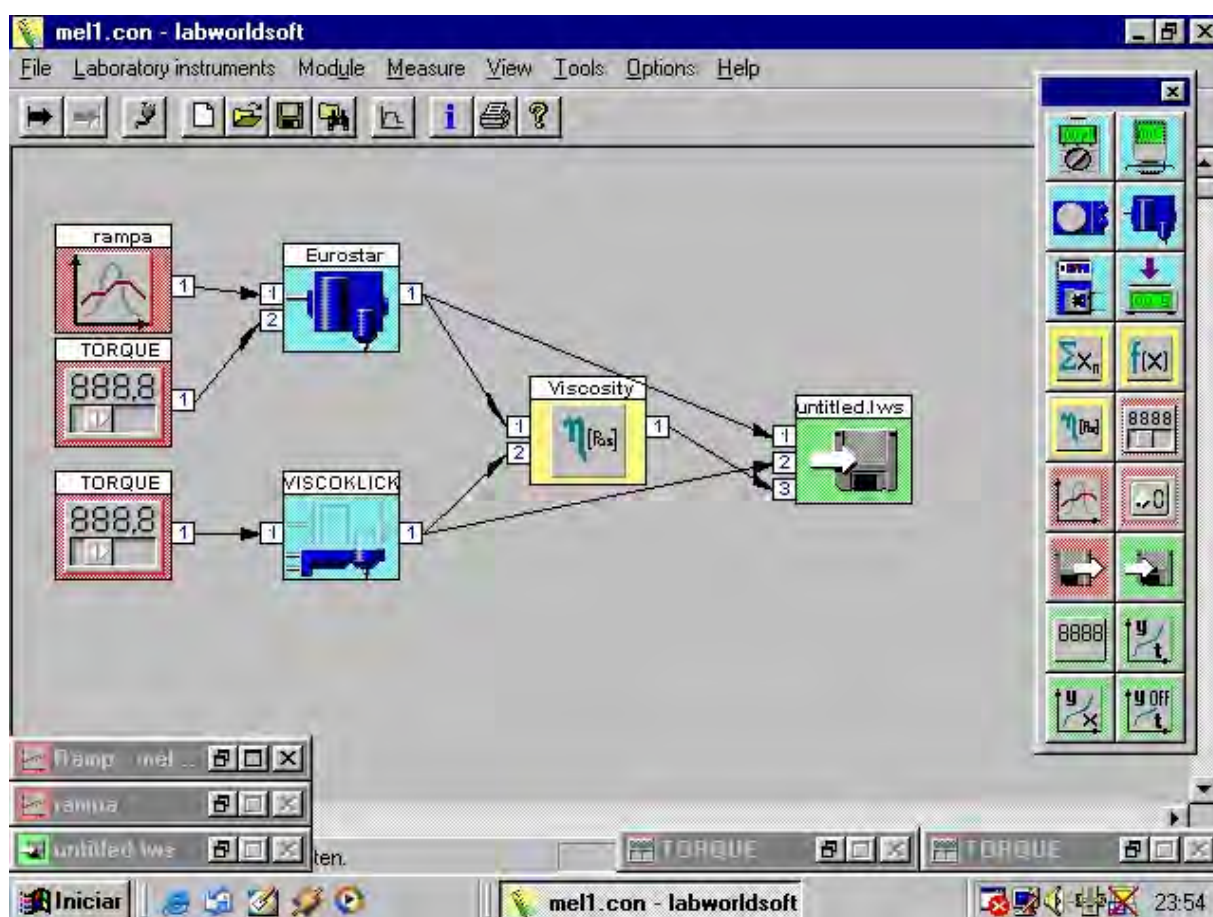


Figura 18 - Programa utilizado para obtenção dos dados reológicos.

Fonte: Labwordsoft

O programa utilizado mostra os blocos em vermelho que indicam os dados de controle utilizados: a rampa de velocidade, que controla a rotação do motor, e que operou automaticamente; a indicação para o programa utilizar os dados do torque fornecido pelo “viscoklick” e a indicação de utilização do “viscoklick” para obter a viscosidade.

O módulo amarelo indica que o operador do programa deseja o valor da viscosidade instantânea do fluido analisado. Para a obtenção da viscosidade foi usado a rotação do motor, o torque obtido pelo “viscoklick” e a densidade do fluido a ser analisado.

A densidade do fluido analisado é informada ao programa computacional através da seleção do módulo da viscosidade. Após a seleção do módulo da viscosidade o quadro da Figura 19 permite a digitação da densidade.

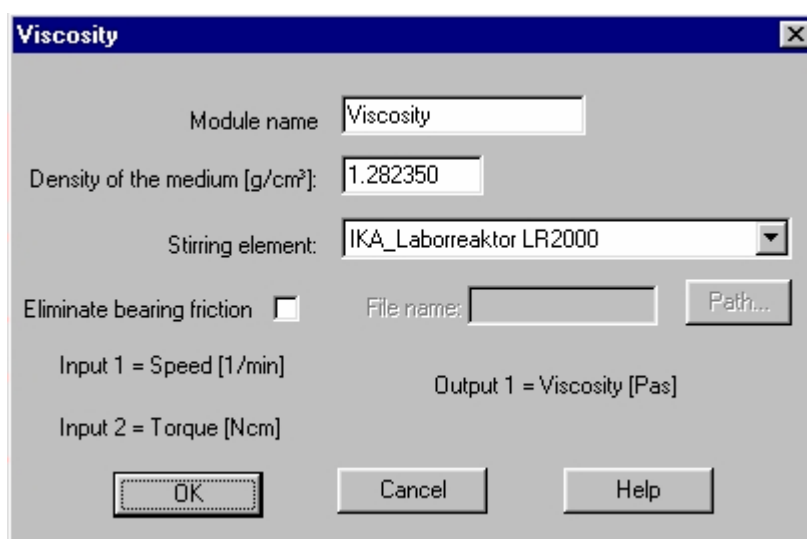


Figura 19 – Ícone da viscosidade onde é fornecido o valor da viscosidade.

Fonte: Labwordsoft

O módulo verde indica quais os dados que o operador deseja que o programa armazene para a análise posterior. No caso foram armazenados os dados da rotação do motor, do torque do “viscoklick” e viscosidade.

A Figura 20 apresenta a rampa de rotação usada nos ensaios para verificar se os produtos utilizados são dependentes do tempo.

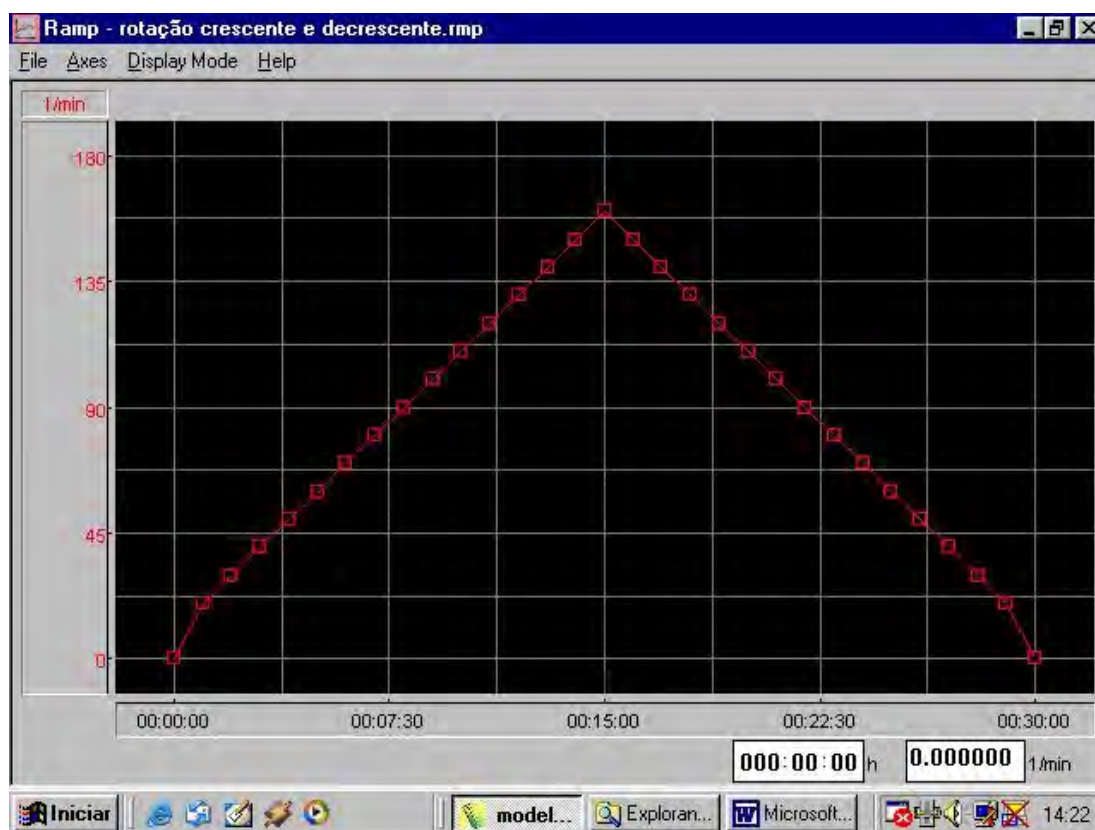


Figura 20 - Rampa de velocidade com rotação crescente e decrescente.

Fonte: Labwordsoft

A rampa, montada pelo operador do equipamento, apresenta a variação da rotação em relação ao tempo de coleta de dados. Nesta rampa, a rotação variou de $0,0 \text{ s}^{-1}$ (0 rpm) à $2,66 \text{ s}^{-1}$ (160 rpm) - rotação crescente - e retornou de $2,66 \text{ s}^{-1}$ (160 rpm) à $0,0 \text{ s}^{-1}$ (0 rpm) - rotação decrescente - em intervalos de tempos iguais.

A rampa de velocidade foi montada desse modo para obter os dados que possibilitam verificar se as curvas de rotação crescente e decrescente, para cada produto, são coincidentes ou não para, de acordo com as Figuras 9 e 10 (Muller, 1973), verificar se os fluidos utilizados eram tixotópicos ou reopéticos.

A Figura 21 mostra a rampa de velocidade utilizada para a obtenção dos parâmetros reológicos.



Figura 21 - Rampa de velocidade com rotação de 0 a $2,5 \text{ s}^{-1}$.

Fonte: Labwordsoft

A rampa, montada pelo operador do equipamento, apresenta a variação da rotação em relação ao tempo de coleta de dados. Nesta rampa, a rotação variou de $0,0 \text{ s}^{-1}$ (0 rpm) à $2,5 \text{ s}^{-1}$ (150 rpm). A rampa apresenta patamares com rotação constante para garantir a coleta de dados em iguais rotações para todos os produtos analisados e assim utilizar a equação (25), caso dois dos fluidos analisados fossem newtonianos.

A rampa de velocidade, para a obtenção dos parâmetros reológicos, deve provocar a variação de rotação em função do tempo para que se possa verificar a variação do torque. A variação da rotação deve ser tal que o equipamento tenha sensibilidade de leitura dos dados. A sensibilidade de leitura de dados é observada através da prática experimental onde, através de uma rampa de velocidade variando da menor rotação à maior rotação possível, pode-se ver para quais intervalos de rotação que se obtém medidas de torque.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

4.1. Caracterização reológica dos produtos usando o sistema de agitação.

4.1.1. Verificação da dependência do tempo

As amostras de mel, suco concentrado de laranja sem adição de açúcar, suco concentrado de goiaba adoçado e suco concentrado de pêssego adoçado todos a 30°C foram colocadas, separadamente, no vaso de agitação e o misturador colocado em operação de acordo com a rampa de velocidade mostrada na Figura 20. O volume de fluido usado foi de 2 L. Os dados foram coletados em intervalos de tempo de 60 segundos. Os valores experimentais estão nas Tabelas A₁, A₂, A₃ e A₄ do Anexo A. Com os valores experimentais do torque e rotação obtidos construiu-se as curvas da Figuras 22, 23, 24 e 25.

4.1.1.1. Mel

A Figura 22 mostra a curva do torque em função da rotação crescente e decrescente obtidas de acordo com a rampa de velocidade da figura 20.

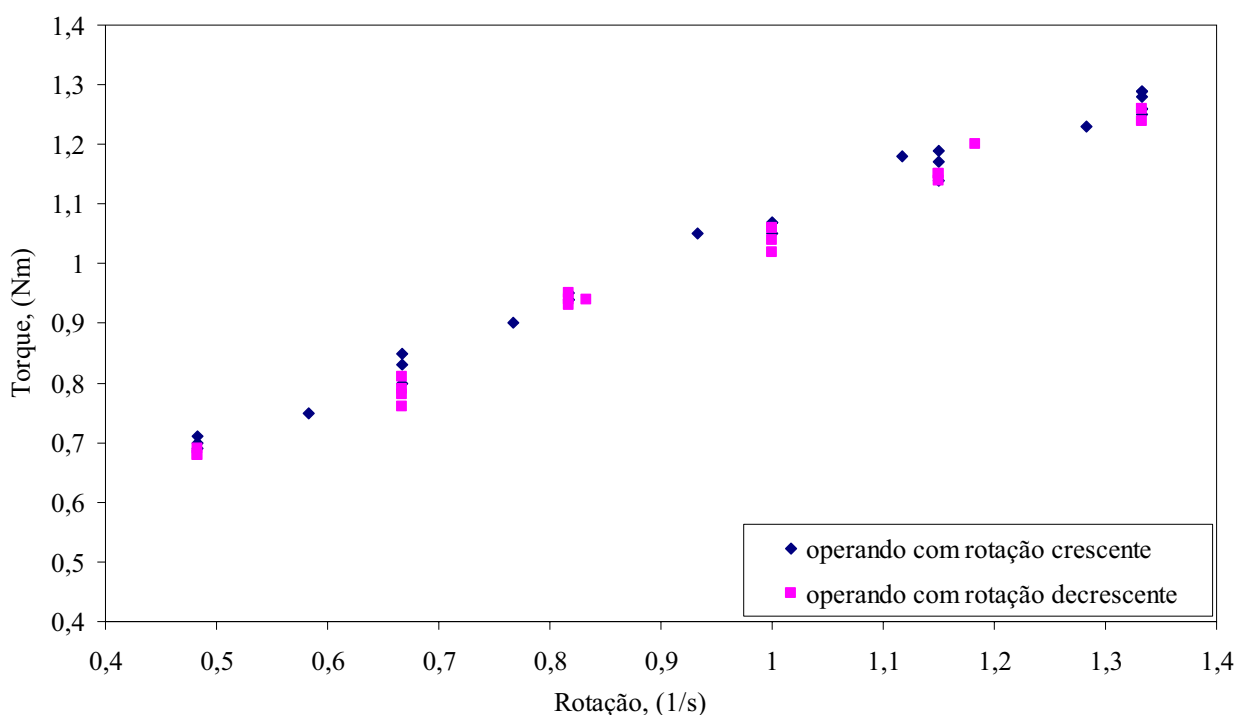


Figura 22 – Gráfico do torque em função da rotação do impelidor obtidos com o sistema de agitação para o mel

A Figura 22 mostra as curvas do torque em função da rotação sobrepondo-se. Logo, o mel apresenta a característica reológica de não ser dependente do tempo.

Vários autores como: Steffe (1992), Rao (1999) e Muller (1973), classificaram o mel com características reológicas de independência com o tempo de rotação ou cisalhamento.

4.1.1.2. Suco concentrado de pêssego

A Figura 23 mostra as curvas do torque em função da rotação crescente e decrescente obtidas de acordo com a rampa de velocidade da figura 20.

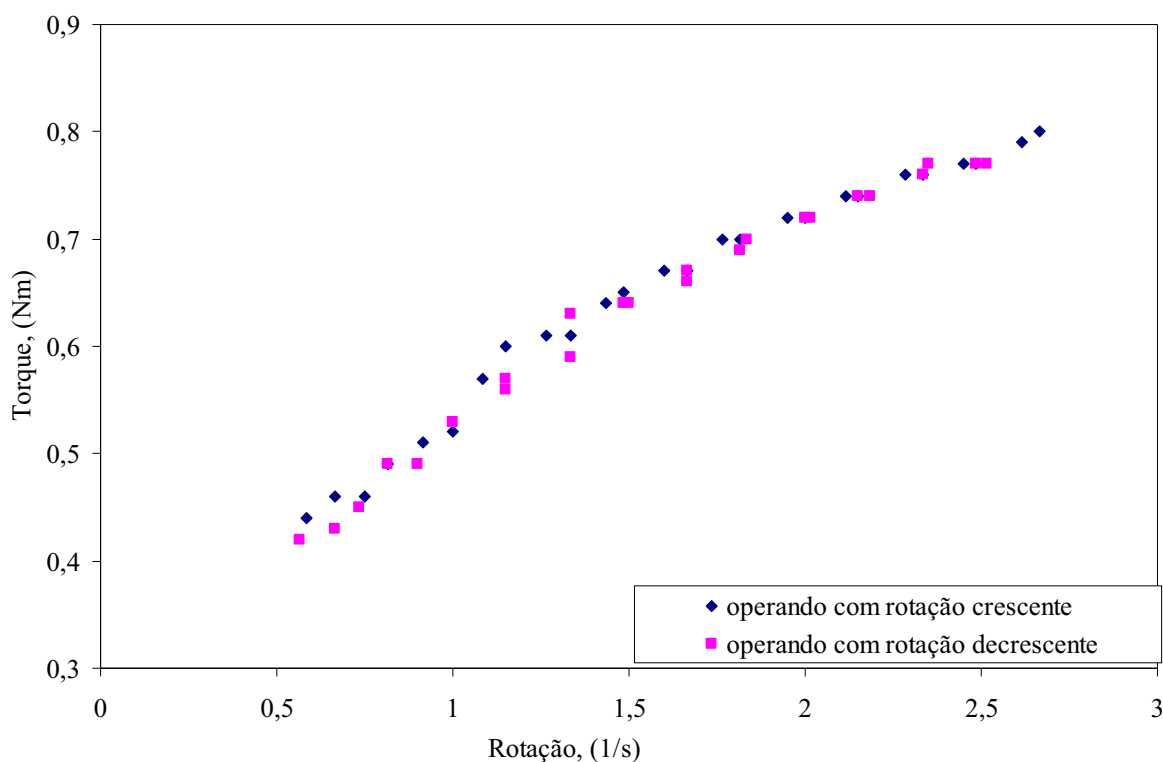


Figura 23 - Gráfico do torque em função da rotação crescente e decrescente do impelidor obtidos com o sistema de agitação com o concentrado de pêssego.

A Figura 23 mostra as curvas do torque em função da rotação sobrepondo-se. Logo, o suco concentrado de pêssego apresenta a característica reológica de não ser dependente do tempo.

Torallles, Vendruscolo e Vendruscolo (2006), classificaram o purê de pêssego com características reológicas de independência com o tempo de rotação ou cisalhamento.

4.1.1.3. Suco concentrado de goiaba

A Figura 24 mostra as curvas do torque em função da rotação crescente e decrescente obtidas de acordo com a rampa de velocidade da figura 20.

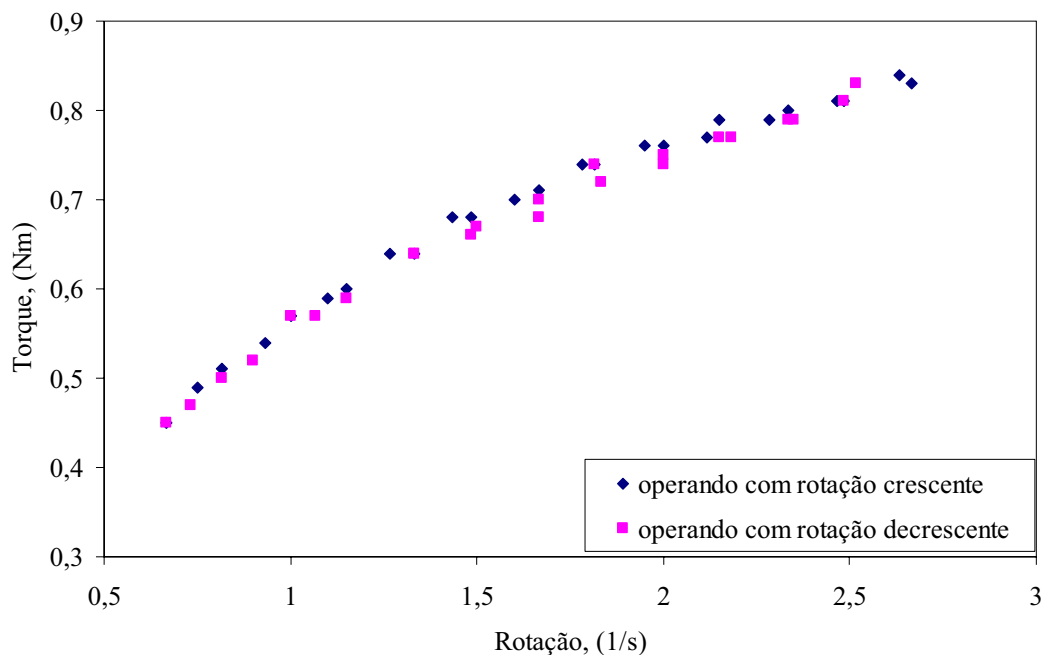


Figura 24 - Gráfico do torque em função da rotação do impelidor obtidos com o sistema de agitação com o suco concentrado de goiaba.

A Figura 24 mostra a curva do torque em função da rotação sobrepondo-se. Logo, o suco de goiaba apresenta a característica de não ser dependente do tempo.

Vasques (2003) e Ferreira *et al.* (2002), classificaram o suco de goiaba com características reológicas de independência o com tempo de rotação ou cisalhamento.

4.1.1.4. Suco concentrado de laranja

A Figura 25 mostra as curvas do torque em função da rotação crescente e decrescente obtidas de acordo com a rampa de velocidade da figura 20.

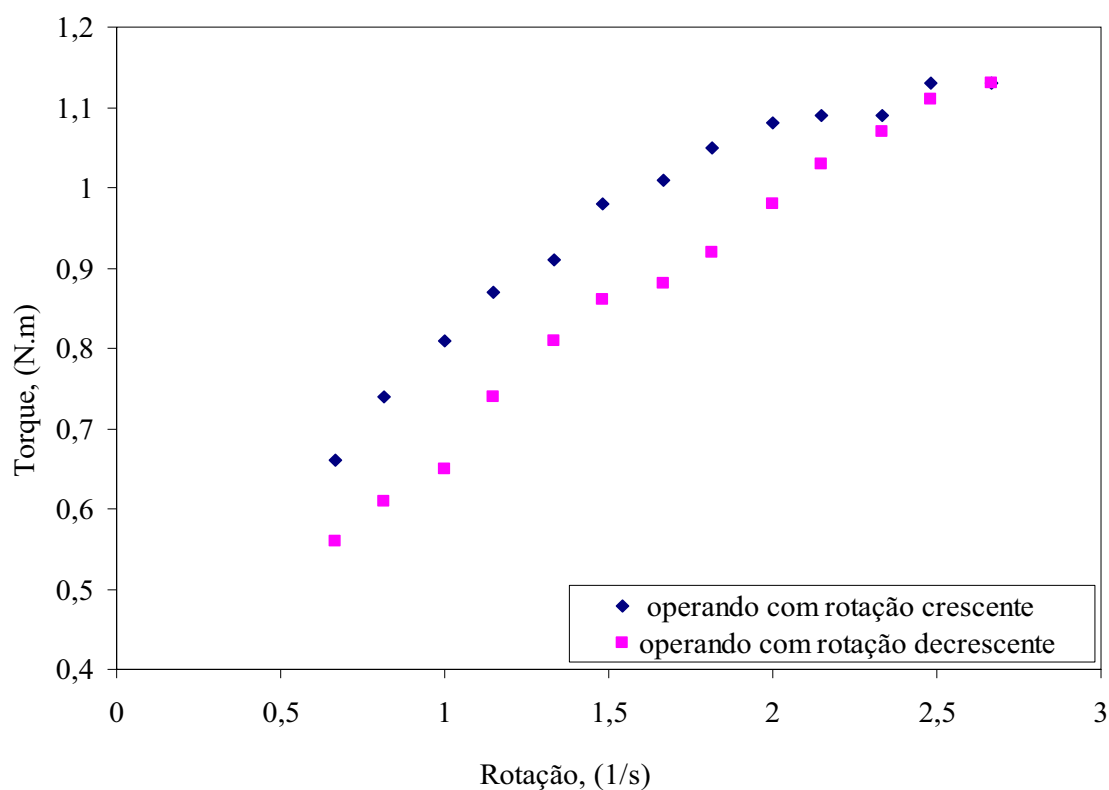


Figura 25 – Gráfico do torque em função da rotação do impelidor obtidos com o sistema de agitação com o suco concentrado de laranja.

A Figura 25 mostra as curvas do torque em função da rotação não sobrepondo-se. Logo, o suco concentrado de laranja analisado apresenta características reológicas de dependência do tempo de rotação ou cisalhamento.

4.1.2. Viscosidade em função da rotação

As Figuras 26, 27, 28 e 29 mostram as curvas da viscosidade em função da rotação crescente e decrescente do mel, suco concentrado de Laranja, suco concentrado de pêssigo e de goiaba. A curva foi feita para verificar a variação da viscosidade em função da rotação e assim poder classificar os fluidos.

4.1.2.1. Mel

A Figura 26 mostra a curva da viscosidade em função da rotação crescente e decrescente. A viscosidade praticamente permaneceu constante com a variação da rotação o que caracteriza o comportamento newtoniano do mel.

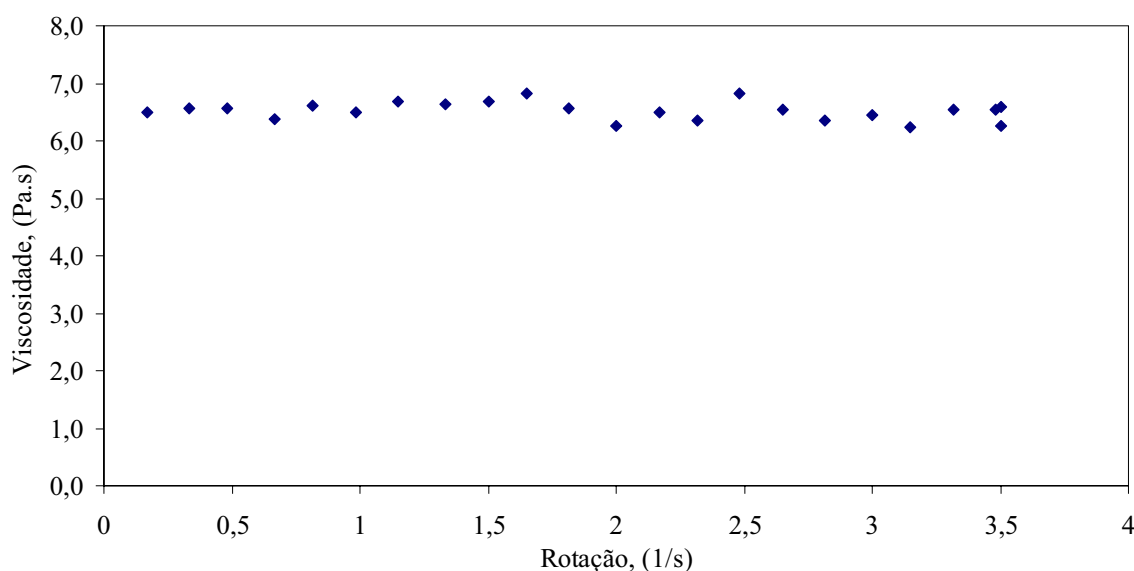


Figura 26 - Gráfico da viscosidade em função da rotação com o mel a 30°C - com a rampa de velocidade da Figura 20.

Vários autores como: Steffe (1992), Rao (1999) e Muller (1973) classificam o mel como independente do tempo e newtoniano.

4.1.2.2. Suco concentrado de pêsego

A curva da Figura 27, mostra a curvas da viscosidade em função da rotação crescente e descendente. A viscosidade diminui com o aumento da rotação caracterizando comportamento pseudoplástico do pêsego. Caracterizando a relação da viscosidade com a rotação.

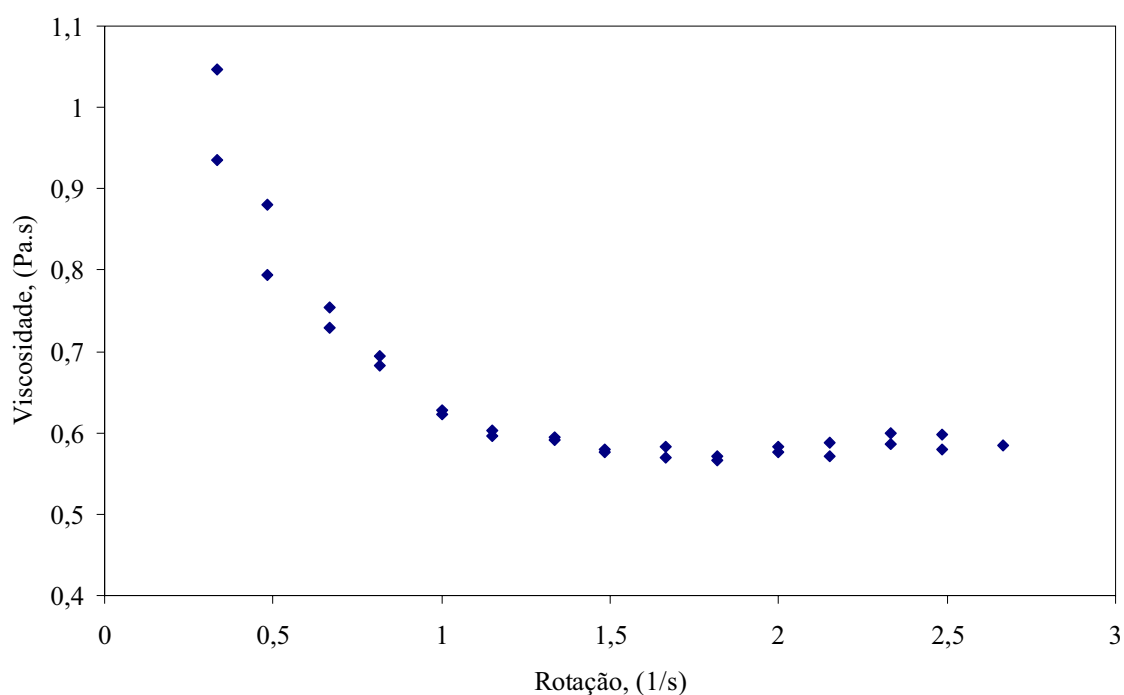


Figura 27 - Gráfico da viscosidade em função da rotação do suco concentrado de pêsego a 30°C - com a rampa de velocidade da Figura 20.

Como há uma variação da viscosidade com a rotação chama-se de viscosidade aparente.

Ao aumentar a rotação, a viscosidade do suco concentrado do pêsego diminui, isso ocorre pois com o aumento da rotação as partículas rígidas se orientam na direção do fluxo. O efeito do cisalhamento normalmente é reversível ou seja, ao cessar a deformação, o fluido volta a ter a viscosidade inicial. Schramm (2006).

Torallles, Vendruscolo e Vendruscolo (2006) classificaram o purê de pêsego como independente do tempo de cisalhamento e pseudoplástico.

4.1.2.3. Suco concentrado de goiaba

A curva da Figura 28, mostra as curvas da viscosidade em função da rotação crescente e decendente. A viscosidade diminui com o aumento da rotação caracterizando comportamento pseudoplástico do suco concentrado da goiaba. Caracterizando a relação da viscosidade com a rotação..

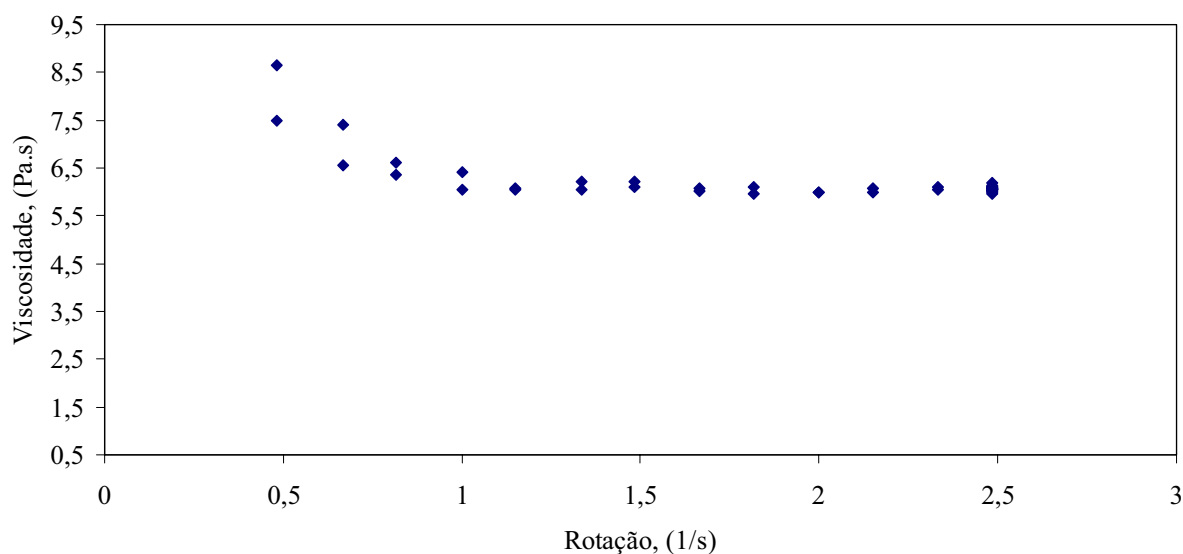


Figura 28 - Gráfico da viscosidade em função da rotação do suco concentrado de goiaba a 30°C - com a rampa de velocidade da Figura 20.

Como há uma variação da viscosidade com a rotação chama-se de viscosidade aparente.

Ao aumentar a rotação, a viscosidade do suco concentrado de goiaba diminui, isto ocorre pois com o aumento da rotação as partículas rígidas se orientam na direção do fluxo. O efeito do cisalhamento normalmente é reversível ou seja, ao cessar a deformação, o fluido volta a ter a viscosidade inicial. Schramm (2006).

Vasques (2003) e Ferreira *et al.* (2002), classificaram o suco de goiaba como independente do tempo e pseudoplástico.

4.1.2.4. Suco concentrado de laranja

As curvas da Figura 29 mostram as curvas da viscosidade em função da rotação crescente e decrescente. Nota-se que as curvas não se sobrepõem, a viscosidade aparente diminui com o aumento da rotação e com o decréscimo da rotação o valor da viscosidade não retorna aos mesmos valores correspondentes às rotações iniciais.

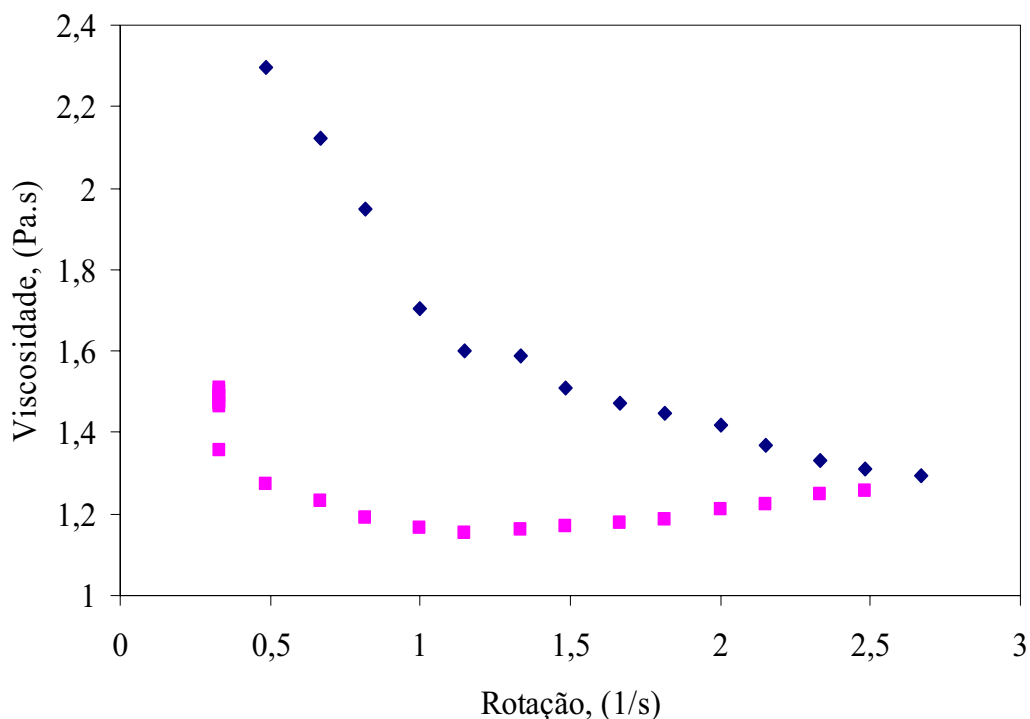


Figura 29 - Gráfico da viscosidade em função da rotação do suco concentrado de laranja a 30°C - com a rampa de velocidade da Figura 20.

Considerando que a taxa de deformação é diretamente proporcional a rotação do impelidor pode-se concluir que a viscosidade aparente não está relacionada exclusivamente com a taxa de deformação mas também com o tempo de duração da aplicação da taxa de deformação caracterizando o comportamento dependente com o tempo como também pode ser observado pelo gráfico da Figura 25. O concentrado de laranja apresentou um comportamento similar ao pseudoplástico porém dependente do tempo de cisalhamento, portanto classifica-se como tixotrópico.

4.1.3. Determinação das constantes reológicas.

As amostras de mel, suco concentrado de laranja, suco concentrado de pêssgo e suco concentrado de goiaba a 30°C foram colocadas, separadamente, no vaso de agitação e o sistema colocado em operação de acordo com a rampa de velocidade mostrada na Figura 20. Os dados foram coletados em intervalos de tempo de 30 segundos. Os valores experimentais estão nas Tabelas B₁, B₂, B₃, e B₄ do Anexo B. Com os valores experimentais obtidos foram construídas as curvas da Figuras 30, 31, 32 e 33 que fornecem os gráficos do logaritmo do torque em função do logaritmo da rotação de cada produto analisado pelo sistema de agitação.

Para fluidos que obedecem a Lei da Potência - Equação (5), o gráfico do logaritmo do torque em função do logaritmo da rotação nos fornece o parâmetro n (índice de escoamento) como sendo o coeficiente angular da reta.

4.1.3.1. Mel

A Figura 30 mostra o gráfico do logaritmo do torque em função do logaritmo da rotação. A equação da reta obtida para o mel é $y = 0,91x - 0,01$, e o coeficiente angular da reta fornece o valor do índice de escoamento. Para o mel, o índice de escoamento obtido foi 0,91.

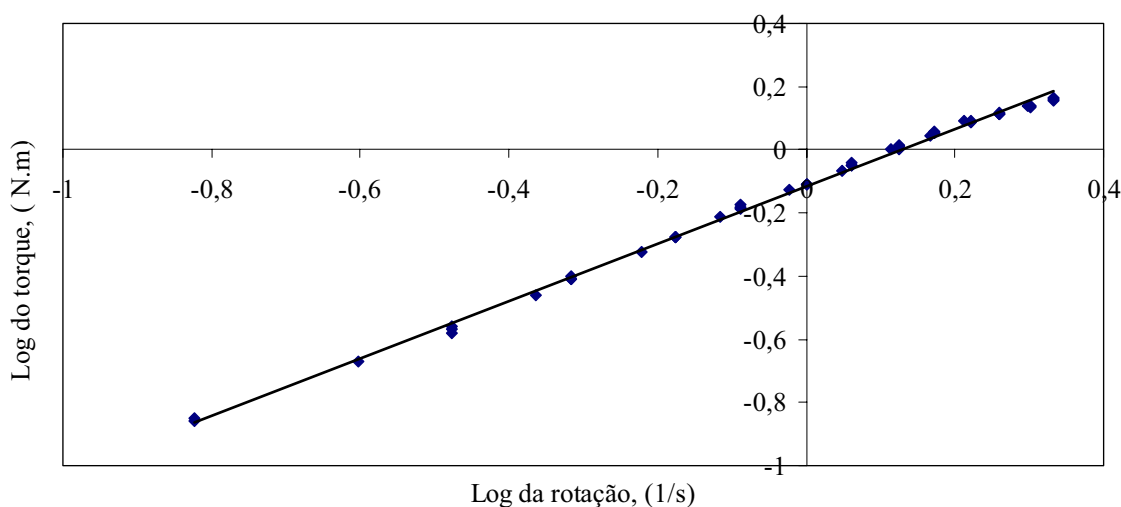


Figura 30 - Gráfico do logaritmo do torque em função do logaritmo da rotação do mel a 30°C.

Aplicando a regressão linear a curva obtêm-se a equação matemática do torque em função da rotação obtidas pelo Sistema de Agitação, $M = 0,77N^{0,91}$ com correlação $R^2 = 1,00$.

4.1.3.2. Suco concentrado de pêssgo

A Figura 31 mostra o gráfico do logaritmo do torque em função do logaritmo da rotação. A equação da reta obtida para o suco concentrado de pêssgo é $y = 0,87x - 1,09$, o coeficiente angular da reta fornece o valor do índice de escoamento. Para o suco concentrado de pêssgo o índice de escoamento obtido foi 0,87

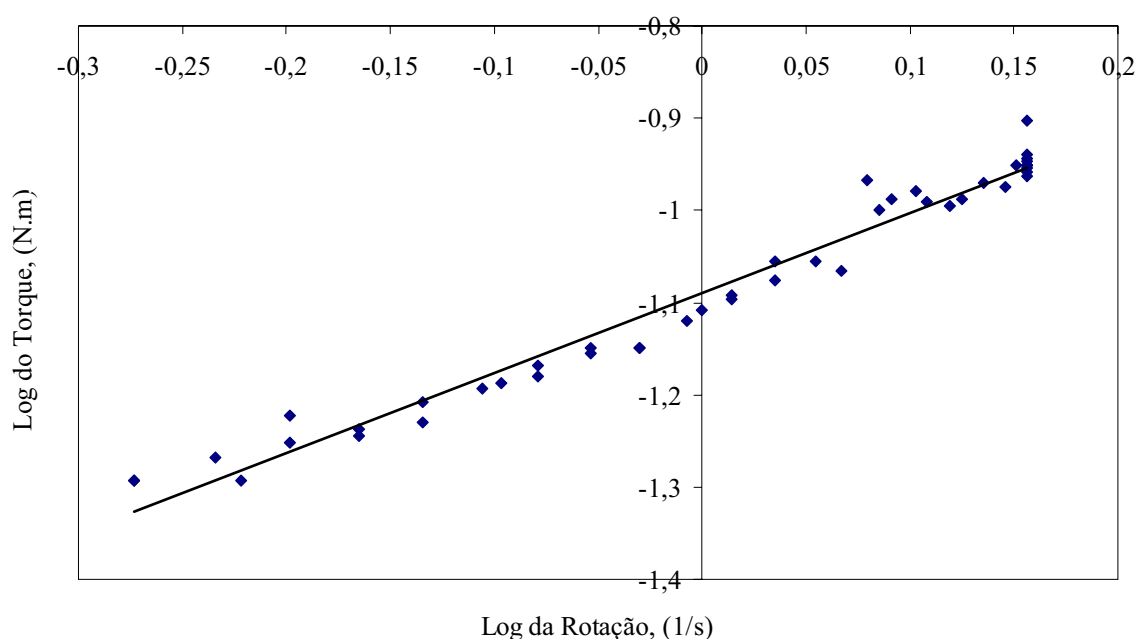


Figura 31 - Gráfico do logaritmo do torque em função do logaritmo da rotação do suco concentrado de pêssgo (30°C).

Aplicando a regressão linear a curva obtêm-se a equação matemática do torque em função da rotação obtidas pelo Sistema de Agitação, $M = 0,08N^{0,87}$ com correlação $R^2 = 0,97$.

4.1.3.3. Suco concentrado de goiaba

A Figura 32 mostra o gráfico do logaritmo do torque em função do logaritmo da rotação. A equação da reta obtida para o suco concentrado de goiaba é $y = 0,72x + 0,95$, o coeficiente angular da reta fornece o valor do índice de escoamento. Para o suco concentrado de goiaba o índice de escoamento obtido foi 0,72

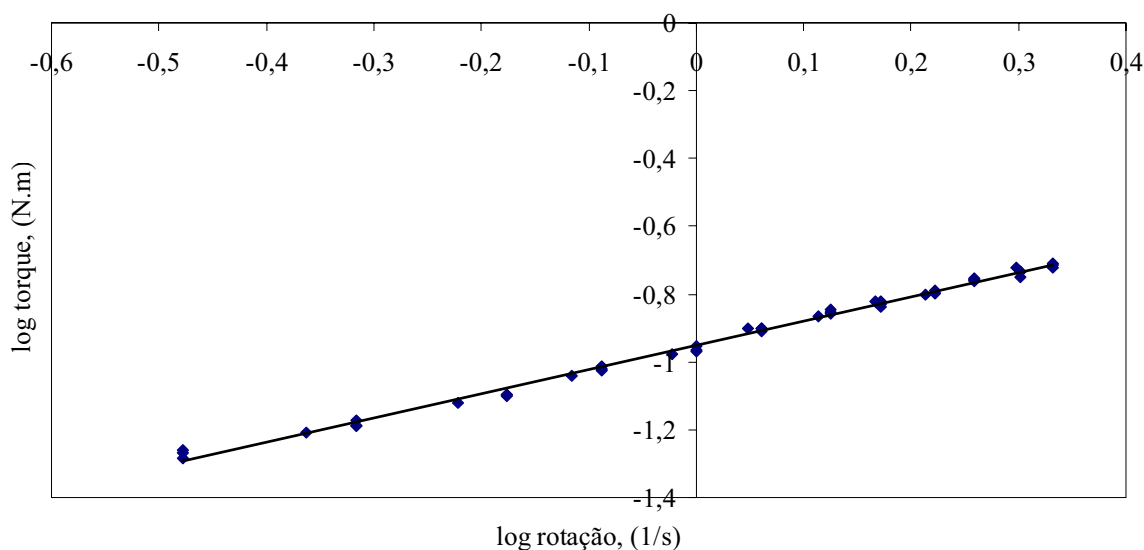


Figura 32 - Gráfico do logaritmo do torque em função do logaritmo da rotação do suco concentrado da Goiaba a 30°C

Aplicando a regressão linear a curva obtêm-se a equação matemática do torque em função da rotação obtidas pelo Sistema de Agitação, $M = 0,12N^{0,72}$ com correlação $R^2 = 1,00$.

4.1.3.4. Suco concentrado de laranja

A Figura 33 mostra o gráfico do logaritmo do torque em função do logaritmo da rotação. A equação da reta obtida através do suco concentrado de laranja é $y = 0,48x - 0,27$, o coeficiente angular da reta fornece o valor do índice de escoamento. Para o suco concentrado de laranja, o índice de escoamento obtido foi 0,48.

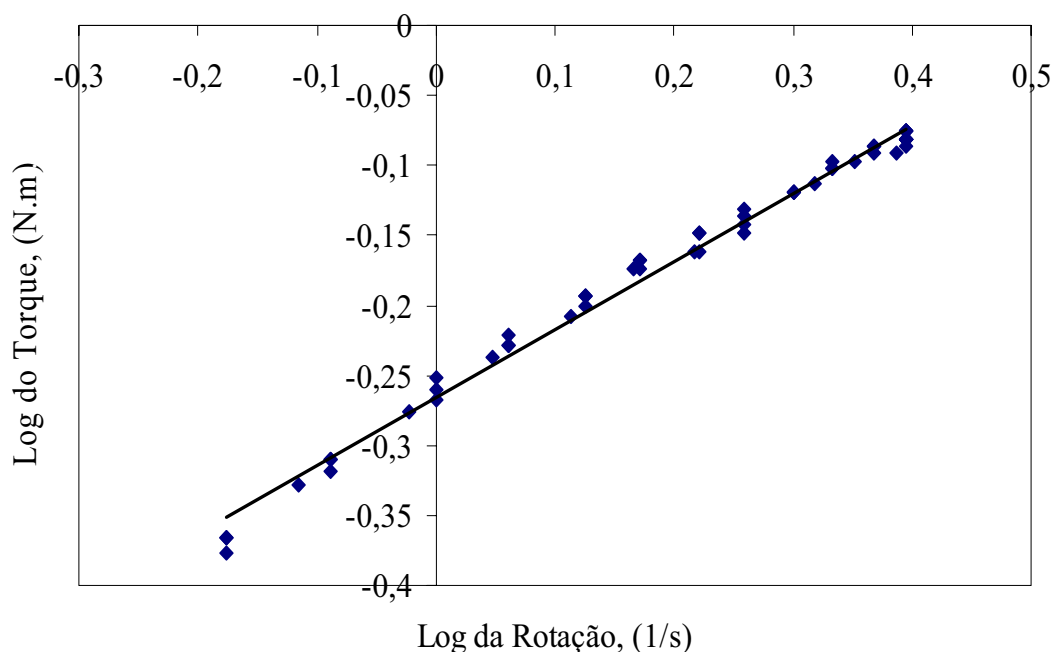


Figura 33 – Gráfico do logaritmo do torque em função do logaritmo da rotação do suco concentrado de laranja a 30°C

Aplicando a regressão linear a curva obtêm-se a equação matemática do torque em função da rotação obtidas pelo Sistema de Agitação, $M = 0,54N^{0,48}$ com correlação $R^2 = 0,99$.

A Tabela 6 fornece as relações matemáticas e os valores dos coeficientes de determinação das curvas obtidas (R^2).

Tabela 6 - Equações que relacionam o torque e rotação obtidas com o Sistema de Agitação

Produto	Relações	R^2
Mel	$M = 0,77N^{0,91}$	0,99
Concentrado de Pêssego	$M = 0,08N^{0,87}$	0,97
Concentrado de Goiaba	$M = 0,11N^{0,72}$	0,99
Concentrado de Laranja	$M = 0,54N^{0,48}$	0,99

Os valores dos índices de escoamento obtidos pelo Sistema de Agitação são fornecidos pelas equações da Tabela 6 através do expoente das equações. A Tabela 7 mostra os índices de escoamento para cada produto.

Tabela 7 - Índice de escoamento obtidos através do Sistema de Agitação

Produto	n (índice de escoamento)
Mel	0,91
Concentrado de Pêssego	0,87
Concentrado de Goiaba	0,72
Concentrado de Laranja	0,48

Os valores de K_s obtidos com os dados do Sistema de Agitação foram calculados através da Equação (24) e são fornecidos na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de K_s obtidos através do Sistema de Agitação

Produto	K_s
Mel	2,95
Concentrado de Pêssego	20,79
Concentrado de Goiaba	10,34
Concentrado de Laranja	17,06

Os valores do índice de consistência (K) foram calculados através da Equação (25) utilizando o valor do índice de consistência e do índice de escoamento do mel, obtidos pelo viscosímetro rotacional Brookfield, como valores padrão (dados na equação com índice x). A Tabela 9 fornece os valores de índice de consistência.

Tabela 9 - Valores do índice de consistência (K) obtidos através do Sistema de Agitação

Produto	índice de consistência (K), (Pa.s ⁿ).
Mel (padrão) - obtido pelo Viscosímetro Brookfield	6,09
Concentrado de Pêssego	0,12
Concentrado de Goiaba	0,32
Concentrado de Laranja	2,60

4.2. Determinação das constantes reológicas através do viscosímetro rotacional Brookfield.

As amostras foram feitas em triplicatas. Os valores utilizados para os reogramas correspondem aos valores dos dados experimentais. Os valores médios experimentais estão nas Tabelas C₁, C₂, C₃ e C₄ do Anexo C.

As Figuras 34, 35, 36 e 37 mostram as curvas de fluxo para o mel, suco concentrado de pêssego, suco concentrado de goiaba e suco concentrado de laranja.

4.2.1. Mel.

A Figura 34 fornece o gráfico da tensão de cisalhamento do mel em função da taxa de deformação. O modelo matemático ajustado à curva foi o da Lei da Potência dado pela equação (5) pois, segundo Rao (1999), é o modelo mais utilizado em produtos

alimentícios. O modelo da lei da potência obtido para o mel foi $\tau = 6,09 \dot{\gamma}^{0,99}$ e o valor do coeficiente de determinação da curva obtida (R^2) para o ajuste da curva do mel é $R^2=1,00$.

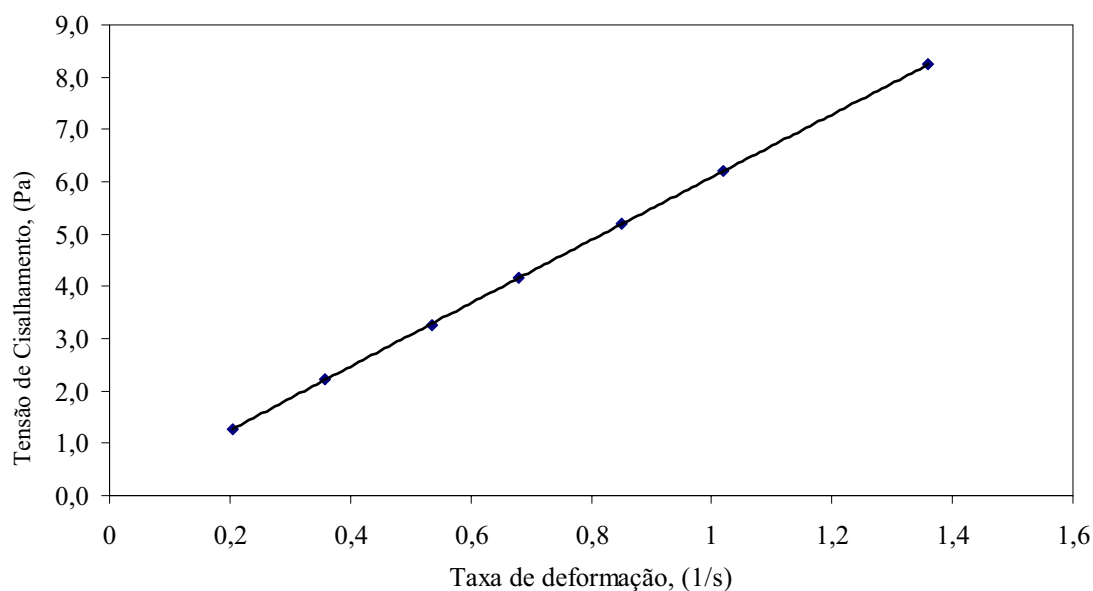


Figura 34 - Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para o mel a 30°C.

Segundo o modelo da Lei da Potência, dado pela equação (5), quando o índice de escoamento (n) for igual a 1, o fluido é newtoniano e o valor da constante de consistência (K) fornece a viscosidade. Os valores de n e K para o mel estão mostrados na Tabela 7.

O desvio percentual experimental do índice de escoamento foi calculado em relação ao valor $n=1$ pela expressão 28:

$$\varepsilon = \left| \frac{\text{valor teórico} - \text{valor experimental}}{\text{valor teórico}} \right| \cdot 100 \quad (27)$$

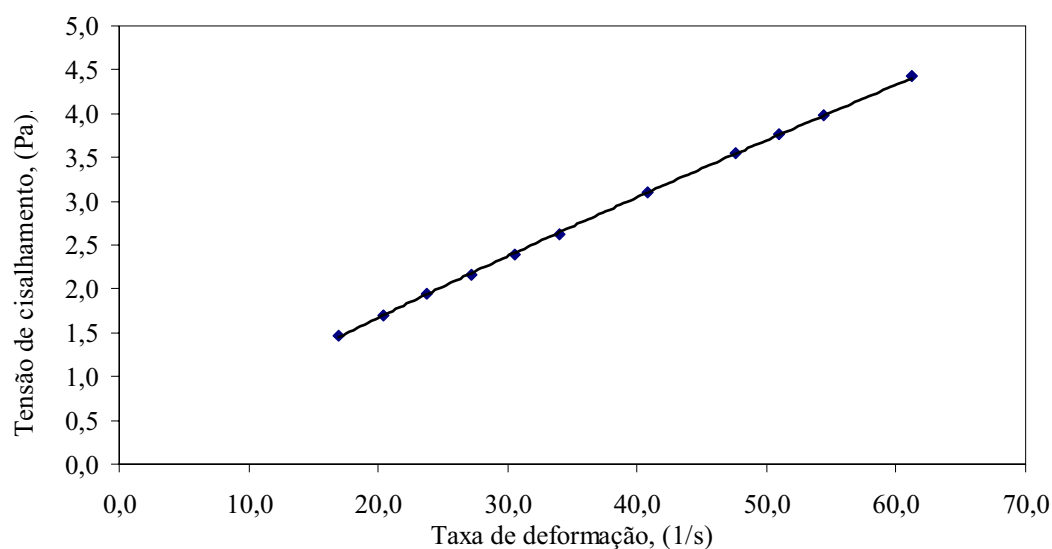
A literatura classifica o mel como fluido newtoniano, portanto com o índice de escoamento igual a 1.

Tabela 10 - Valores experimentais de n e K para o mel.

Produto	n (índice de escoamento)	ε (%)	K (Pa.s ^{n}) (índice de consistência)
Mel (30°C)	0,99	1,4%	6,09

4.2.2. Suco concentrado de pêssego.

A Figura 35 fornece o gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação. O modelo matemático ajustado à curva foi o da Lei da Potência dado pela equação (5). O modelo da Lei da Potência obtido para o suco concentrado de pêssego foi $\tau = 0,12 \dot{\gamma}^{0,87}$ e o valor do coeficiente de determinação da curva obtida (R^2) para o ajuste da curva é $R^2 = 1,00$.

**Figura 35** – Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação do suco concentrado de pêssego a 30°C.

Para este suco obteve-se o valor de $n < 1$. Como a análise com o Sistema de Agitação para o pêssego indica a independência do tempo e obteve-se $0 \leq n \leq 1$ pode-se concluir que o suco concentrado de pêssego apresenta um comportamento pseudoplástico.

A Tabela 11 resume as características reológicas do suco concentrado de pêssgo obtidas com o viscosímetro rotacional Brookfield.

Tabela 11 - Valores experimentais de n e K para o suco concentrado de pêssgo.

	Índice de escoamento (n)	Índice de consistência (K) (Pa.s ^{n})	Classificação do fluido
Pêssgo	0,87	0,12	Pseudoplástico

4.2.3. Suco concentrado de goiaba.

A Figura 36 fornece o gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação. O modelo matemático ajustado à curva foi o da Lei da Potência dado pela equação (5). O modelo da Lei da Potência obtido para o suco concentrado de goiaba foi $\tau = 0,34 \dot{\gamma}^{0,76}$ e o valor do coeficiente de determinação da curva obtida (R^2) para o ajuste da curva é $R^2=1,00$.

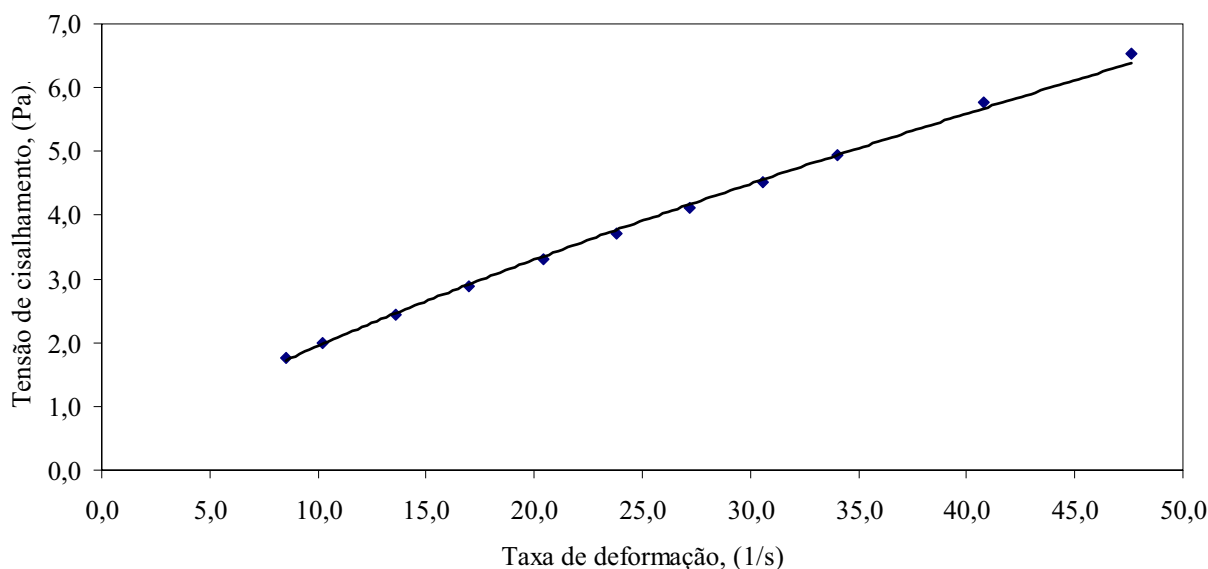


Figura 36 - Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação do suco concentrado de goiaba a 30°C.

Para o suco concentrado de goiaba obteve-se o valor de $n < 1$. Como a análise com o Sistema de Agitação para a goiaba indica a independência do tempo e obteve-se $0 \leq n \leq 1$ pode-se concluir que o suco concentrado de goiaba apresenta um comportamento pseudoplástico.

A Tabela 12 resume as características reológicas do suco concentrado de goiaba obtidas com o viscosímetro rotacional Brookfield.

Tabela 12 - Valores experimentais de n e K para o suco concentrado de goiaba.

	Índice de escoamento (n)	Índice de consistência (K) (Pa.s ^{n})	Classificação do fluido
Goiaba	0,76	0,34	Pseudoplástico

4.2.4. Suco concentrado de laranja.

A Figura 37 fornece o gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação. O modelo matemático ajustado à curva foi o da Lei da Potência dado pela equação (5). O modelo da lei da potência obtido para laranja foi $\tau = 2,75 \dot{\gamma}^{0,51}$ e o valor do coeficiente de determinação da curva obtida (R^2) para o ajuste da curva da laranja é $R^2=1,00$.

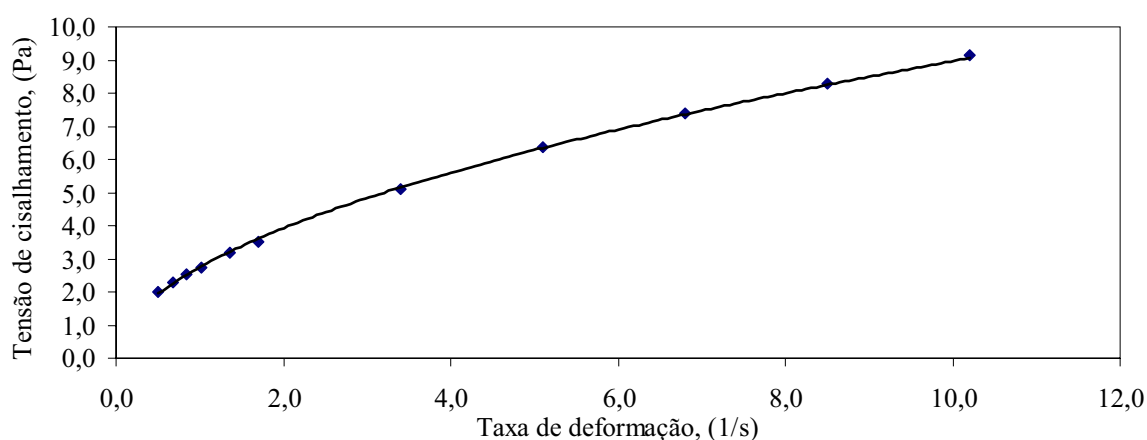


Figura 37 - Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação do suco concentrado da Laranja a 30°C.

Para o suco concentrado laranja obteve-se o valor de $n < 1$ o que indica um comportamento pseudoplástico porém, como mostra o gráfico da Figura 25, o suco de laranja é dependente do tempo. Pode-se concluir que o suco concentrado da laranja apresenta um comportamento tixotrópico.

A Tabela 13 resume as características reológicas do suco concentrado da laranja obtida com o viscosímetro rotacional Brookfield.

Tabela 13 - Valores experimentais de n e K para o suco concentrado de laranja.

	Índice de escoamento (n)	Índice de consistência (K)	Classificação do fluido
		(Pa.s^n)	
Laranja	0,51	2,75	Tixotrópico

4.3. Comparação entre os resultados obtidos com o Sistema de Agitação e com o viscosímetro Brookfield.

A Tabela 14 apresenta os valores das viscosidades obtidas com o Sistema de Agitação, com o Viscosímetro Brookfield e o desvio percentual

Tabela 14 - Valores da viscosidade para o mel (produto newtoniano).

	Viscosidade (Pa.s)		Desvio percentual (%)
	Sistema de Agitação	Viscosímetro Brookfield	
Mel (30°)	6,68	6,31	5,8 %

O desvio percentual obtido para o mel é aceitável e justificado por erros acidentais.

A Tabela 15 compara os valores do índice de escoamento obtido pelo viscosímetro rotacional Brookfield e o Sistema de Agitação.

Tabela 15 - Valores do índice de escoamento dos produtos estudados obtidos com o Sistema de Agitação e o viscosímetro rotacional Brookfield.

Índice de escoamento			
	Sistema de Agitação	Viscosímetro Brookfield	Desvio percentual
Mel	0,91	0,99	7,8 %
Suco concentrado de Pêssego	0,87	0,87	0,0%
Suco concentrado de Goiaba	0,72	0,76	5,3 %
Suco concentrado de Laranja	0,48	0,51	5,8 %

O desvio percentual obtido com o mel, suco concentrado de laranja sem adição de açúcar, suco concentrado de goiaba adoçado e suco concentrado de pêssego adoçado são aceitáveis e justificados por desvios acidentais. O desvio percentual de 0,0 % não implica em ausência de erros experimentais e sim a proximidade dos valores obtidos pelo viscosímetro rotacional e do Sistema de Agitação.

A Tabela 16 compara os valores do índice de consistência obtido pelo viscosímetro rotacional Brookfield e o Sistema de Agitação.

Tabela 16 - Valores do índice de consistência dos produtos estudados obtidos com o Sistema de Agitação e o viscosímetro rotacional Brookfield.

Índice de consistência			
	Sistema de Agitação	Viscosímetro Brookfield	Desvio percentual
Mel (padrão)	6,09	-----	-----
Suco concentrado de Pêssego	0,12	0,12	0,0%
Suco concentrado de Goiaba	0,32	0,34	5,8%
Suco concentrado de Laranja	2,60	2,75	5,6%

O desvio percentual obtido com o mel, laranja, goiaba e pêssego são aceitáveis e justificados por erros accidentais. O desvio percentual de 0,0 % não implica em ausência de erros experimentais e sim a proximidade dos valores obtidos pelo viscosímetro rotacional e do Sistema de Agitação.

4.4. Cálculo da Potência requerida no processo de mistura ou agitação :

Nas indústrias, que realizam misturas de fluidos em grandes sistemas de agitação, o conhecimento da potência requerida no processo de agitação ou mistura é necessário para definir projetos de equipamentos com desempenho melhor e com um menor consumo de energia.

Para o cálculo da potência, todas as amostras foram analisadas no Sistema de Agitação com o impelidor tipo âncora modificada, com a temperatura de trabalho dos produtos constante e igual a 30°C.

A Figura 38 mostra os valores da potência experimental em função da rotação. Os valores calculados das potências estão no Apêndice D nas Tabelas D₁, D₂, D₃ e D₄.

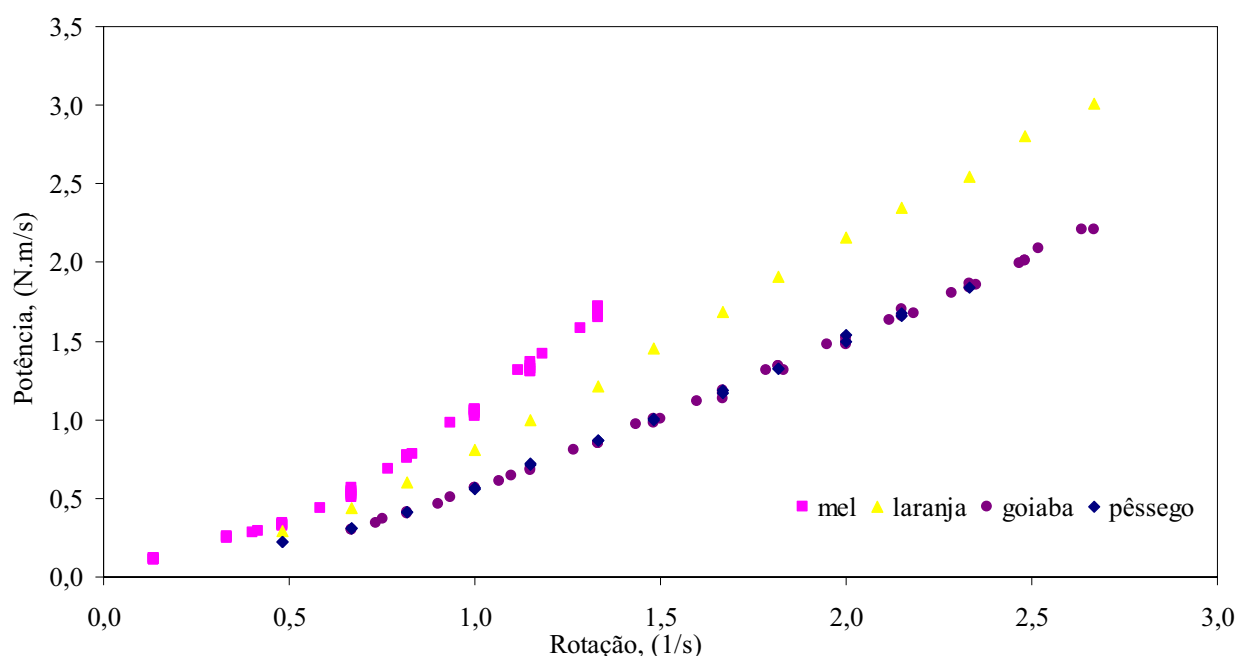


Figura 38 - Valores experimentais da potência em relação à rotação para todos os produtos analisados

Conforme o gráfico da Figura 38 todas as amostras analisadas dos produtos apresentam uma maior potência requerida com o acréscimo da rotação. O mel se destaca com a maior potência requerida, visto que este produto apresenta nas análises anteriores a maior viscosidade.

Os sucos concentrados de goiaba e pêssego apresentaram o consumo de potência próximos logo, para uma aplicação direta em uma linha de bombeamento desses fluidos e/ou de mistura ou agitação, com o mesmo equipamento é possível mover e/ou misturar esses sucos.

A Tabela 16 mostra as equações da potência requerida em função da rotação para cada produto.

Através das equações da potência em função da rotação pode-se determinar, a potência requerida para efetuar uma agitação ou mistura dos fluidos analisados.

Tabela 17 - Relação matemática da Potência requerida em função da rotação.

Produto	Potência em Função da rotação
Mel	$P = 1,03N^{1,19}$
Laranja	$P = 0,81N^{1,40}$
Goiaba	$P = 0,56N^{1,44}$
Pêssego	$P = 0,58N^{1,39}$

5. CONCLUSÕES

- O mel analisado apresentou características newtonianas. A viscosidade do mel não alterou com a variação da rotação (Sistema de Agitação) ou com a variação da taxa de deformação (Viscosímetro Rotacional Brookfield). Steffe (1992), Rao (1999), Muller (1973), Schramm (2006), classificaram o mel como independente do tempo e newtoniano.

- O suco concentrado de pêssego apresentou comportamento não-newtoniano independente do tempo. A viscosidade aparente diminuiu com o aumento da rotação e retorna aos mesmos valores quando diminuiu a rotação. O fluido apresentou um comportamento pseudoplástico. Toraliles, Vendruscolo e Vendruscolo (2006), classificaram o purê de pêssego como independente do tempo de cisalhamento.

- O suco concentrado de goiaba apresentou comportamento não-newtoniano independente do tempo. A viscosidade aparente diminuiu com o aumento da rotação e retorna aos valores quando diminui a rotação. O fluido apresentou um

comportamento pseudoplástico. Vasques (2003) e Ferreira *et al.* (2002), classificaram o suco de goiaba como independente do tempo e pseudopástico.

- O suco concentrado de laranja (sem adição de açúcar) apresentou um comportamento não-newtoniano dependente do tempo. A viscosidade aparente diminuiu com o aumento da rotação e não retornou aos valores correspondentes aos valores iniciais. O fluido apresentou um comportamento tixotrópico.

- O modelo da Lei da Potência foi o modelo matemático adequado para determinar os parâmetros reológicos dos produtos.

- A comparação entre os valores obtidos com o Sistema de Agitação e com o viscosímetro rotacional Brookfield para o índice de escoamento e o índice de consistência forneceu erros percentuais experimentais variando de 0,0% à 7,8% . O Sistema de Agitação é eficaz para efetuar a análise reológica de fluidos.

- Os desvios percentuais obtidos do Sistema de Agitação, considerando os valores fornecidos pelo viscosímetro rotacional Brookfield como padrão, são aceitáveis e justificados por erros acidentais.

- Quanto maior a viscosidade aparente do fluido analisado maior foi o consumo da potência do equipamento que processa uma mistura ou agitação. Nos fluidos analisados o mel apresentou a maior potência requerida no processo de agitação enquanto os sucos concentrados de pêssego e goiaba apresentaram potências requeridas muito próximas, no processo de agitação.

- É necessário um motor com uma potência maior para processar uma agitação com o mel de abelhas a 30°C, porém o mesmo motor é muito potente para processar agitação de sucos concentrados de laranja sem adição de açúcar, suco concentrado de goiaba adoçado e suco concentrado de pêssego adoçado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS

BAKSHI, A.K.; KAWATRA, S.K. Rapid determination of non-Newtonian flow behaviour in mineral suspensions. **Minerals and Metallurgical Processing**, New York: 1996. v. 13, no 4, p. 165-9.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTER, K. **An Introduction to rheology**, New York: Elsevier Science Publishers, 1985.

BATTAGLINI, N. M. P. **Avaliação do comportamento de impelidores especiais na mistura de fluidos. 116 p.** Botucatu. 1998, Tese (Doutorado em Agronomia – Área de concentração em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. **Transport Phenomena**. New York: 1960: John Willey & Sons, 1960. 780 p.

BORWANKAR, R. P. Food Texture and Rheology: A Tutorial Review. *Journal of Food Engineering*. New York: 1992. v. 16, n 1 e 2.

BROWN, G. G., FOUST, A. S., KATZ, D.V. Agitation. In: Operaciones Básicas Ingeniería Química. Editorial Marín S.A, 1963. cap.34, p.528-34.

BUTLER, F. & MCNULTY, P. Time dependent rheological characterization of buttermilk at 5°C. **Journal of Food Engineering**. New York: 1999. v.42, p.199-206.

CHENG, D. H. & EVANS, F. Phenomenological characterization of the rheological behavior of inelastic reversible thixotropic and antithixotropic fluids. **Journal of Applied Physics**, British: 1965; v. 16, p. 1599-1617.

COUTINHO, A. P. C. **Caracterização reológica do extrato de tomate e verificação da potência requerida na agitação com impelidor tipo âncora.** 2003. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista.

DEÁK, A., HAVAS, G.S., AWINSKY, J. The power requirements for anchor, ribbon and helical – screw agitators. **International Chemical Engineering.** New York: 1985. v.25, n.3, p.558-565, july.

DICKEY, D.S. Program chooses agitador. **Chemical Engineering Progress**, p. 22-31, 1991.

FERREIRA, G. M., QUEIROZ, A. J. M., GASPARETTO, R. S. C. C. A. Efeito da temperatura no comportamento reológico das polpas de caju e goiaba. **Revista Ciências Exatas e Naturais.** p. 175-184. vol. 4, nº2, 2002.

FERREIRA, V. L. P.; MORI, E. E. M. **Seminários Sobre Qualidade na Indústria de Alimentos.** Campinas: 1993. 146p.

FOUST, A.S., WENZEL, L. A., CHAMP, C. W., MAUS, L. ANDERSON L.B. **Princípios de Operações Unitárias.** Companhia Editorial Continental SA. México: 1975. p.523-9.

FOX, R.W.; MC DONALD, A T. e MELO, A M **Introdução à mecânica dos fluidos.** Rio de Janeiro, Guanabara Dois S.A , 1995, 269 p.

FRYER, P. J.; PYLE, D. L. e RIELLY, C. D. **Chemical engineering for the food industry.** London, Champman & Hall, 1997.

GRATÃO, A. C. A.; BERTO, M.I.; SILVEIRA JÚNIOR, V. **Reologia do açúcar líquido invertido: influência da temperatura na viscosidade.** Ciência e Tecnologia dos Alimentos, Campinas, 652-656, 2004.

HO, F. C., KWONG, A. **A guide to designing chemical engineering.** p.94-104, 23,1974.

JOHNSON, J.A., SRISUTHEP, R. Physical and chemical properties of oligosaccharides in **Cereal Chemical**, v. 52, p. 70-78, 1975.

METZNER, A.B. e OTTO, R. E. Agitation of non-newtonian fluids. **The Chemical Engineering Journal**. Czechoslovakia: 1957. n3 p.3-10.

MIZRAHI, S. e BERK, Z. Flow behavior of concentrated orange juice: mathematical treatment. **Journal Texture Studies**. New York: 1972. v. 3, p. 69-79.

MULLER, H.G. **Introduccion a la reologia de los alimentos**, Editora Acribia, Zaragoza, 1973 , 174p.

NOVÁK, V., RIGER, F. Homogenization efficiency of helical ribbon and anchor agitators. **The Chemical Engineering Journal**. Czechoslovakia, p. 63-70, Maio 1974.

PEREZ, C. E. M., STEFFE, J. F. Evaluating shear rates for power law fluids in mixer viscometry. **Journal of Texture Studies**, 21, p.439-453,1990.

PETRELLIS, N. C.; FLUMERFELD, R. W. Rheological behaviour of shear degradable oils: Kinetic and equilibrium properties. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, Canada: 1973. p.291-301.

POSSA, M. V. Comportamento reológico de polpas de minério, **Série Tecnológica Mineral**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2000. 37p. - (Série Tecnologia Mineral, 77).

RAO, M. A. Measurement of flow properties of food suspensions with a mixer, **Journal of texture Studies**, New York, v6, p. 533-539, 1975.

RAO, M. A. **Rheology of fluid and semisolid food**: principles and applications. Aspen Publishers, Inc., 1999. 433 p.

RAO, M. A.; BOURNE, M. C.; COOLEY, H. J. Flow Properties of tomato concentrates. **Journal of Food Engineering**, New York, v.12, p.521-538, 1981.

RAO, M. A.; COOLEY, H. J. Applicability of flow models with yield for tomato concentrates. **Journal of Food Engineering**, New York, v.6, n. 3, p.159-173, 1983.

RUSHTON, J. H., OLDSHUED,J.Y. Mixing theory and pratice. **Chemical Engineering Progress**, New York, v.49, n.4, p.161-8, 1953.

RIGER, F.; NOVAK, V. Power consumption of agitators in highly viscous non-newtonian liquids. **Trans I. Chem. E.** 51: p.105-111.1973.

RUSHTON, J.H., COLTICH, E.W., EVERETT. Power characteristics of mixing impellers – Part 1. **Chemical Engineering Progress**. New York, p.395-402. April, 1953.

RUSHTON, J.H., OLDSHUE, J. Y. Mixing - present theory and pratice. **Chemical Engineering Progress**, New York, v.49, n.4, p. 161-8, April, 1950.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria**. 2 ed. Rio de Janeiro: Artliber Editora Ltda, 2006.232p.

SHAW, D.J. (1992) Rheology. In: **Introduction to Colloid and Surface Chemistry**. Butterworths-Heinemann Ltd, fourth edition, chapter 9, p. 244-61.

SILVA, F.C. **Reologia do suco de acerola: efeito da concentração e da temperatura**. 2000. Campinas, 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos , Universidade Estadual de Campinas.

STEFFE, J.F. **Rheological methods in food process engineering**. East Lansing: Freeman Press, 1992. 226 p.

STREET, R. L. e VENNARD, J. K. **Elementos de Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. 687p.

TANNER, R.I. **Engineering rheology**. Clarendon, 1985. 451 p.

TIU, C.; BOGER, D. V. Rheological properties of food products and their use in the design of flow system. **Food Technology in Australia**, Clayton, v.26, n8, p. 355-335, 1974.

TORALLES, R.P.; VENDRUSCOLO, J.L.; VENDRUSCOLO, C. T. Reologia de Purê Homogeneizado de Pêssego: Efeito da Temperatura e Concentração. **Brazilian journal of Food Technology**. v.9, n.1, p. 1-8, jan./mar. 2006.

TRAXLER, R. N. - **El asfalto, su composición, propiedades y usos**. Companhia Editorial Continental. México. 1961.

VASQUES C. T. **Reologia do suco de goiaba: efeito da diluição e do tamanho de partícula**. Florianópolis, 2003, 62p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos – Desenvolvimento de Processos da Indústria de Alimentos), Universidade de Santa Catarina.

WELTMAN, R. N. Breakdown of thyrotrophic structure as a function of time. **Journal of Applied Physics**, British: 1943. v. 14, p. 343-350.

7. APÊNDICE

Anexo A - Medidas obtidas através do Sistema de Agitação utilizando a rampa de rotação da Figura 23.

A₁ - Mel (30°C).

Tempo (100 m s)	Rotação (1/s)	Torque (N.m)	Viscosidade (Pa.s)
1534	0,33	0,74	7,43
1840	0,42	0,71	7,85
2147	0,48	0,70	7,72
2453	0,48	0,69	8,02
2759	0,48	0,71	7,94
3065	0,58	0,75	8,02
3371	0,67	0,83	7,92
3678	0,67	0,85	7,87
3984	0,67	0,80	7,75
4290	0,77	0,90	7,61
4596	0,82	0,94	7,37
4902	0,82	0,95	7,25
5208	0,82	0,94	6,97
5514	0,93	1,05	6,81
5821	1,00	1,07	6,56
6127	1,00	1,07	6,33
6433	1,00	1,05	6,14
6740	1,12	1,18	6,04
7046	1,15	1,17	5,92
7352	1,15	1,14	5,83
7658	1,15	1,19	5,68
7964	1,28	1,23	5,68
8270	1,33	1,29	5,57
8576	1,33	1,28	5,59
8882	1,33	1,26	5,49
9188	1,33	1,29	5,48
9494	1,33	1,25	5,42
9800	1,33	1,26	5,46
10105	1,33	1,26	7,43
10412	1,33	1,24	7,85
10717	1,33	1,26	7,72

A₁ - Mel (30°C), (continuação)

Tempo (100 m s)	Rotação (1/s)	Torque (N.m)	Viscosidade (Pa.s)
11023	1,18	1,20	8,02
11330	1,15	1,14	7,94
11636	1,15	1,15	8,02
11942	1,15	1,15	7,92
12252	1,00	1,04	7,87
12558	1,00	1,02	7,75
12863	1,00	1,06	7,61
13169	1,00	1,06	7,37
13476	0,83	0,94	7,25
13782	0,82	0,94	6,97
14088	0,82	0,93	6,81
14394	0,82	0,95	6,56
14701	0,67	0,76	6,33
15008	0,67	0,78	6,14
15314	0,67	0,79	6,04
15620	0,67	0,81	5,92
15926	0,48	0,68	5,83
16236	0,48	0,68	5,68
16541	0,48	0,69	5,68
16848	0,40	0,71	5,57
17155	0,33	0,76	5,59
17460	0,33	0,78	5,49
17766	0,33	0,77	5,48
18073	0,13	0,85	5,42
18378	0,13	0,86	5,46
18684	0,13	0,90	7,43
18991	0,13	0,86	7,85
19297	0,13	0,86	7,72
19603	0,13	0,89	8,02
19909	0,13	0,91	7,94

A₂ - Laranja (30°C).

Tempo (100 m.s)	Rotação (1/s)	Torque (N.m)	Viscosidade (Pa.s)
2430	0,48	0,60	2,30
3036	0,67	0,66	2,12
3643	0,82	0,74	1,95
4250	1,00	0,81	1,70
4856	1,15	0,87	1,60
5463	1,33	0,91	1,59
6070	1,48	0,98	1,51
6676	1,67	1,01	1,47
7283	1,82	1,05	1,45
7891	2,00	1,08	1,42
8497	2,15	1,09	1,37
9104	2,33	1,09	1,33
9710	2,48	1,13	1,31
10317	2,67	1,13	1,29
10924	2,48	1,11	1,26
11530	2,33	1,07	1,25
12137	2,15	1,03	1,22
12744	2,00	0,98	1,21
13350	1,82	0,92	1,19
13957	1,67	0,88	1,18
14563	1,48	0,86	1,17
15170	1,33	0,81	1,16
15777	1,15	0,74	1,15
16383	1,00	0,65	1,17
16990	0,82	0,61	1,19
17596	0,67	0,56	1,23
18203	0,48	0,53	1,27
18809	0,33	0,64	1,35
19416	0,33	0,65	1,51
20021	0,33	0,64	1,50

A₃ - Pêssego (30°C).

Tempo (100m.s)	Rotação (1/s)	Torque (Pa)	Viscosidade (Pa.s)
307	0,13	0,76	0,54
613	0,00	0,01	-0,10
920	0,33	0,59	-0,10
1225	0,42	0,52	0,86
1531	0,48	0,45	0,80
1838	0,58	0,44	0,75
2144	0,67	0,46	0,69
2451	0,75	0,46	0,65
2757	0,82	0,49	0,62
3063	0,92	0,51	0,61
3369	1,00	0,52	0,61
3676	1,08	0,57	0,59
3982	1,15	0,60	0,56
4288	1,27	0,61	0,59
4595	1,33	0,61	0,58
4901	1,43	0,64	0,56
5208	1,48	0,65	0,56
5514	1,60	0,67	0,56
5820	1,67	0,67	0,56
6126	1,77	0,70	0,53
6433	1,82	0,70	0,55
6739	1,95	0,72	0,54
7045	2,00	0,72	0,54
7352	2,12	0,74	0,54
7658	2,15	0,74	0,55
7964	2,28	0,76	0,55
8271	2,33	0,76	0,56
8577	2,45	0,77	0,56
8883	2,48	0,77	0,56
9190	2,62	0,79	0,57
9496	2,67	0,80	0,57
9802	2,52	0,77	0,57
10109	2,48	0,77	0,56
10416	2,35	0,77	0,57
10722	2,33	0,76	0,56
11029	2,18	0,74	0,55

A₃ - Pêssego (30°C), (continuação)

Tempo (100 m.s)	Rotação (1/s)	Torque (N.m)	Viscosidade (Pa.s)
11336	2,15	0,74	0,55
11642	2,02	0,72	0,56
11948	2,00	0,72	0,55
12255	1,83	0,70	0,55
12561	1,82	0,69	0,56
12868	1,67	0,67	0,55
13175	1,67	0,66	0,56
13481	1,50	0,64	0,56
13788	1,48	0,64	0,56
14095	1,33	0,59	0,57
14401	1,33	0,63	0,56
14708	1,15	0,57	0,56
15014	1,15	0,56	0,58
15320	1,00	0,53	0,57
15627	0,90	0,49	0,57
15933	0,82	0,49	0,60
16240	0,73	0,45	0,59
16547	0,67	0,43	0,64
16853	0,57	0,42	0,64
17160	0,48	0,45	0,67
17467	0,40	0,51	0,72
17773	0,33	0,61	0,78
18079	0,12	0,74	0,88
18385	0,12	0,77	1,52
18691	0,12	0,71	1,47

A₄ - Goiaba (30°C).

Tempo (100m.s)	Rotação (1/s)	Torque (N.m)	Viscosidade (Pa.s)
2153	0,67	0,45	0,70
2460	0,75	0,49	0,69
2766	0,82	0,51	0,66
3074	0,93	0,54	0,65
3381	1,00	0,57	0,63
3687	1,10	0,59	0,61
3993	1,15	0,60	0,61

A₄ - Goiaba (30°C), (continuação)

Tempo (100 m s)	Rotação (1/s)	Torque (N.m)	Viscosidade (Pa.s)
4300	1,27	0,64	0,62
4606	1,33	0,64	0,63
4912	1,43	0,68	0,62
5218	1,48	0,68	0,64
5525	1,60	0,70	0,65
5831	1,67	0,71	0,64
6138	1,78	0,74	0,65
6445	1,82	0,74	0,63
6751	1,95	0,76	0,63
7058	2,00	0,76	0,62
7365	2,12	0,77	0,63
7671	2,15	0,79	0,62
7978	2,28	0,79	0,62
8285	2,33	0,80	0,62
8591	2,47	0,81	0,62
8898	2,48	0,81	0,62
9205	2,63	0,84	0,62
9511	2,67	0,83	0,63
9818	2,52	0,83	0,63
10125	2,48	0,81	0,62
10431	2,35	0,79	0,62
10738	2,33	0,79	0,62
11045	2,18	0,77	0,62
11350	2,15	0,77	0,61
11657	2,00	0,75	0,61
11964	2,00	0,74	0,61
12270	1,83	0,72	0,61
12576	1,82	0,74	0,61
12883	1,67	0,70	0,61
13189	1,67	0,68	0,61
13496	1,50	0,67	0,61
13802	1,48	0,66	0,61
14109	1,33	0,64	0,61
14415	1,33	0,64	0,61
14721	1,15	0,59	0,61
15028	1,07	0,57	0,62

A₄ - Goiaba (30°C), (continuação)

Tempo (100 m s)	Rotação (1/s)	Torque (N.m)	Viscosidade (Pa.s)
15334	1,00	0,57	0,62
15641	0,90	0,52	0,62
15948	0,82	0,50	0,64
16254	0,73	0,47	0,65
16561	0,67	0,45	0,67

Anexo B - Medidas obtidas através do Sistema de Agitação utilizando a rampa de rotação da Figura 22.

B₁ - Mel (30°C)

Tempo (100m.s)	Rotação (1/s)	Torque (N.m)	Viscosidade (Pa.s)
613	0,12	-1,14	1,84
1218	0,00	0,01	-0,10
1823	0,00	0,01	-0,10
2429	0,17	0,12	8,44
3034	0,33	0,17	8,34
3640	0,48	0,22	8,06
4245	0,67	0,28	7,87
4851	0,82	0,33	7,61
5457	0,98	0,38	7,43
6063	1,15	0,43	7,15
6669	1,33	0,49	6,93
7275	1,50	0,55	6,59
7880	1,65	0,60	6,52
8486	1,82	0,67	6,32
9092	2,00	0,72	6,17
9697	2,17	0,77	6,00
10303	2,32	0,83	5,96
10909	2,48	0,88	5,82
11515	2,65	0,94	5,85
12121	2,82	1,00	5,75
12727	3,00	1,06	5,74
13333	3,15	1,12	5,63
13938	3,32	1,17	5,63
14544	3,50	1,23	5,49

B₁ - Mel (30°C) (continuação).

Tempo (100m s)	Rotação (1/s)	Torque (N.m)	Viscosidade (Pa.s)
15149	3,48	1,21	5,44
15753	3,50	1,21	5,21

B₂ - Laranja (30°C)

Tempo (100m s)	Rotação (1/s)	Torque (N.m)	Viscosidade (Pa.s)
307	0,13	-0,13	-0,10
613	0,00	0,01	-0,10
919	0,00	0,01	-0,10
1226	0,00	0,02	-0,10
1532	0,15	0,72	-0,10
1838	0,15	0,71	1,25
2144	0,15	0,73	1,27
2450	0,25	0,65	1,25
2757	0,33	0,60	0,98
3063	0,33	0,58	0,89
3369	0,33	0,58	0,89
3675	0,42	0,50	0,86
3984	0,48	0,46	0,80
4289	0,48	0,46	0,79
4595	0,48	0,47	0,77
4901	0,60	0,43	0,76
5207	0,67	0,46	0,75
5513	0,67	0,47	0,72
5819	0,67	0,45	0,73
6125	0,77	0,47	0,72
6432	0,82	0,52	0,73
6738	0,82	0,52	0,72
7044	0,82	0,50	0,73
7351	0,95	0,56	0,71
7658	1,00	0,56	0,71
7963	1,00	0,57	0,70
8269	1,00	0,57	0,69
8575	1,12	0,62	0,70
8882	1,15	0,61	0,71
9188	1,15	0,61	0,71

B₂ - Laranja (30°C), (continuação)

Tempo (100 m s)	Rotação (1/s)	Torque (N.m)	Viscosidade (Pa.s)
9494	1,15	0,62	0,70
9800	1,30	0,67	0,70
10106	1,33	0,67	0,71
10413	1,33	0,66	0,70
10719	1,33	0,68	0,70
11025	1,47	0,69	0,70
11332	1,48	0,71	0,71
11638	1,48	0,71	0,72
11943	1,48	0,71	0,72
12250	1,63	0,74	0,74
12556	1,67	0,73	0,75
12862	1,67	0,73	0,74
13168	1,67	0,74	0,73
13474	1,82	0,77	0,76
13780	1,82	0,78	0,75
14086	1,82	0,78	0,75
14391	1,82	0,78	0,75
14697	1,98	0,80	0,75
15003	2,00	0,80	0,75
15309	2,00	0,80	0,75
15615	2,00	0,80	0,75
15921	2,15	0,83	0,74
16227	2,15	0,83	0,76
16532	2,15	0,83	0,76
16839	2,25	0,84	0,76
17147	2,33	0,86	0,77
17452	2,33	0,86	0,75
17758	2,33	0,86	0,77
18064	2,42	0,87	0,76
18370	2,48	0,88	0,78
18676	2,48	0,88	0,79
18982	2,48	0,88	0,79

B₃ - Goiaba (30°C)

Tempo (100m s)	Rotação (1/s)	Torque (N.m)	Viscosidade (Pa.s)
1230	0,00	0,00	-0,01
1536	0,15	0,05	0,45
1842	0,15	0,05	0,45
2148	0,15	0,04	0,43
2454	0,25	0,05	0,49
2761	0,33	0,05	0,54
3067	0,33	0,06	0,55
3372	0,33	0,05	0,52
3678	0,43	0,06	0,62
3985	0,48	0,07	0,65
4290	0,48	0,07	0,65
4596	0,48	0,07	0,67
4903	0,60	0,08	0,76
5209	0,67	0,08	0,80
5515	0,67	0,08	0,80
5820	0,67	0,08	0,79
6126	0,77	0,09	0,91
6433	0,82	0,10	0,97
6739	0,82	0,10	0,95
7045	0,82	0,09	0,94
7352	0,95	0,11	1,05
7659	1,00	0,11	1,07
7965	1,00	0,11	1,08
8271	1,00	0,11	1,11
8577	1,12	0,13	1,25
8885	1,15	0,13	1,25
9191	1,15	0,12	1,23
9497	1,15	0,13	1,26
9803	1,30	0,14	1,36
10110	1,33	0,14	1,40
10417	1,33	0,14	1,39
10723	1,33	0,14	1,43
11028	1,47	0,15	1,51
11335	1,48	0,15	1,51
11640	1,48	0,15	1,46
11946	1,48	0,15	1,48

B₃ - Goiaba (30°C) (continuação).

Tempo (100 m s)	Rotação (1/s)	Torque (N.m)	Viscosidade (Pa.s)
12253	1,63	0,16	1,58
12560	1,67	0,16	1,60
12866	1,67	0,16	1,62
13172	1,67	0,16	1,59
13478	1,82	0,17	1,73
13784	1,82	0,18	1,75
14090	1,82	0,18	1,76
14395	1,82	0,17	1,74
14702	1,98	0,19	1,89
15009	2,00	0,18	1,84
15314	2,00	0,18	1,78
15620	2,00	0,18	1,84
15927	2,15	0,20	1,95
16232	2,15	0,19	1,90
16538	2,15	0,19	1,94
16845	2,25	0,19	1,94
17150	2,33	0,20	1,95
17458	2,33	0,19	1,94
17763	2,33	0,19	1,94
18069	2,42	0,20	2,00
18375	2,48	0,20	2,04
18681	2,48	0,21	2,06
18987	2,48	0,21	2,05
19293	2,48	0,21	2,06
19599	2,48	0,20	2,04
19903	2,48	0,21	2,06

B₄ - Pêssego (30°C).

Tempo (100 m s)	Rotação (1/s)	Torque (N.m)	Viscosidade (Pa.s)
2458	0,12	0,73	0,35
2764	0,13	0,72	0,38
3070	0,17	0,72	0,37
3377	0,20	0,67	0,39
3684	0,22	0,66	0,37
3990	0,23	0,62	0,37
4297	0,27	0,60	0,41
4604	0,28	0,58	0,40
4910	0,33	0,57	0,42
5217	0,33	0,52	0,43
5524	0,37	0,52	0,43
5830	0,40	0,49	0,44
6138	0,43	0,46	0,48
6445	0,43	0,46	0,48
6751	0,48	0,41	0,50
7057	0,48	0,42	0,51
7365	0,53	0,39	0,51
7672	0,53	0,41	0,51
7978	0,58	0,39	0,54
8285	0,60	0,41	0,51
8591	0,63	0,39	0,56
8897	0,63	0,40	0,60
9203	0,68	0,43	0,58
9509	0,68	0,42	0,57
9816	0,73	0,44	0,59
10122	0,73	0,44	0,62
10428	0,78	0,44	0,64
10735	0,80	0,46	0,65
11041	0,83	0,49	0,68
11348	0,83	0,46	0,66
11655	0,88	0,49	0,71
11961	0,88	0,49	0,70
12267	0,93	0,49	0,71
12573	0,93	0,50	0,71
12879	0,98	0,53	0,76
13185	1,00	0,51	0,78

B₄ - Pêssego (30°C) (continuação).

Tempo (100 m s)	Rotação (1/s)	Torque (N.m)	Viscosidade (Pa.s)
13492	1,03	0,53	0,80
13798	1,03	0,54	0,81
14104	1,08	0,56	0,84
14410	1,08	0,54	0,88
14717	1,13	0,57	0,88
15023	1,17	0,57	0,86
15332	1,20	0,58	1,08
15638	1,22	0,58	1,00
15944	1,23	0,60	1,03
16250	1,27	0,60	1,05
16557	1,28	0,61	1,02
16863	1,32	0,61	1,01
17169	1,33	0,62	1,03
17476	1,37	0,62	1,07
17784	1,40	0,63	1,06
18091	1,42	0,63	1,12
18398	1,43	0,63	1,11
18703	1,43	0,65	1,15
19009	1,43	0,65	1,25
19315	1,43	0,64	1,14
19621	1,43	0,63	1,13
19927	1,43	0,64	1,12
20233	1,43	0,63	1,10
20539	1,43	0,64	1,12
20844	1,43	0,65	1,12
21150	1,43	0,63	1,09
21456	1,43	0,64	1,16
21762	1,43	0,64	1,12
22068	1,43	0,63	1,11
22374	1,43	0,63	1,11
22680	1,43	0,64	1,20
22986	1,43	0,65	1,21
23292	1,43	0,64	1,20

Anexo C - Medidas obtidas com viscosímetro rotacional Brookfield.

C₁ - Mel (30°C).

Tensão de cisalhamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)	Taxa de deformação (s ⁻¹)
1,27	6,24	0,20
2,22	6,22	0,36
3,27	6,12	0,54
4,16	6,11	0,68
5,19	6,11	0,85
6,21	6,09	1,02
8,25	6,07	1,36

C₂ - Laranja (30°C).

Tensão de cisalhamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)	Taxa de deformação (s ⁻¹)
2,00	3,91	0,51
2,28	3,35	0,68
2,52	2,96	0,85
2,75	2,69	1,02
3,17	2,34	1,36
3,53	2,08	1,70
5,11	1,50	3,40
6,36	1,25	5,10
7,40	1,09	6,80
8,30	0,98	8,50
9,13	0,90	10,20

C₃ - Goiaba (30°C)

Tensão de cisalhamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)	Taxa de deformação (s ⁻¹)
1,75	0,21	8,50
2,00	0,20	10,20
2,45	0,18	13,60
2,89	0,17	17,00
3,31	0,16	20,40
3,71	0,16	23,80

C₃ - Goiaba (30°C) (continuação).

Tensão de cisalhamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)	Taxa de deformação (s⁻¹)
4,12	0,15	27,20
4,52	0,15	30,60
4,94	0,15	34,00
5,76	0,14	40,80
6,53	0,14	47,60

C₄ – Pêssego (30°C).

Tensão de cisalhamento (Pa)	Viscosidade (Pa.s)	Taxa de deformação (s⁻¹)
1,47	0,09	17,00
1,70	0,08	20,40
1,94	0,08	23,80
2,16	0,08	27,20
2,40	0,08	30,60
2,62	0,08	34,00
3,10	0,08	40,80
3,55	0,07	47,60
3,76	0,07	51,00
3,99	0,07	54,40
4,44	0,07	61,20

Anexo D - Medidas das Potências e das Rotações obtidas através do Sistema de Agitação.

D₁ – Mel (30°C).

Potência (N.m/s)	Rotação (1/s)
0,25	0,33
0,30	0,42
0,34	0,48
0,33	0,48
0,34	0,48
0,44	0,58
0,55	0,67
0,57	0,67

D₁ – Mel (30°C). (continuação)

Potência (N.m/s)	Rotação (1/s)
0,53	0,67
0,69	0,77
0,77	0,82
0,78	0,82
0,77	0,82
0,98	0,93
1,07	1,00
1,07	1,00
1,05	1,00
1,32	1,12
1,35	1,15
1,31	1,15
1,37	1,15
1,58	1,28
1,72	1,33
1,71	1,33
1,68	1,33
1,72	1,33
1,67	1,33
1,68	1,33
1,68	1,33
1,65	1,33
1,68	1,33
1,42	1,18
1,31	1,15
1,32	1,15
1,32	1,15
1,04	1,00
1,02	1,00
1,06	1,00
1,06	1,00
0,78	0,83
0,77	0,82
0,76	0,82

D₁ – Mel (30°C). (continuação)

Potência (N.m/s)	Rotação (1/s)
0,78	0,82
0,51	0,67
0,52	0,67
0,53	0,67
0,54	0,67
0,33	0,48
0,33	0,48
0,33	0,48
0,28	0,40
0,25	0,33
0,26	0,33
0,26	0,33
0,11	0,13
0,11	0,13
0,12	0,13
0,11	0,13
0,11	0,13
0,12	0,13
0,12	0,13

D₂ – Laranja (30°C).

Potência (N.m/s)	Rotação (1/s)
0,29	0,48
0,44	0,67
0,60	0,82
0,81	1,00
1,00	1,15
1,21	1,33
1,45	1,48
1,68	1,67
1,91	1,82
2,16	2,00
2,34	2,15
2,54	2,33

D₂ – Laranja (30°C) (continuação).

Potencia (N.m/s)	Rotação (1/s)
2,81	2,48
3,01	2,67
2,76	2,48
2,50	2,33
2,21	2,15
1,96	2,00
1,67	1,82
1,47	1,67
1,28	1,48
1,08	1,33
0,85	1,15
0,65	1,00
0,50	0,82
0,37	0,67
0,26	0,48
0,21	0,33
0,22	0,33
0,21	0,33

D₃ – Pêssego (30°C).

Potencia (N.m/s)	Rotação (1/s)
0,10	0,13
0,00	0,00
0,20	0,33
0,22	0,42
0,22	0,48
0,26	0,58
0,31	0,67
0,35	0,75
0,40	0,82
0,47	0,92
0,52	1,00
0,62	1,08
0,69	1,15

D₃ – Pêssego (30°C) (continuação).

Potencia (N.m/s)	Rotação (1/s)
0,77	1,27
0,81	1,33
0,92	1,43
0,96	1,48
1,07	1,60
1,12	1,67
1,24	1,77
1,27	1,82
1,40	1,95
1,44	2,00
1,57	2,12
1,59	2,15
1,74	2,28
1,77	2,33
1,89	2,45
1,91	2,48
2,07	2,62
2,13	2,67
1,94	2,52
1,91	2,48
1,81	2,35
1,77	2,33
1,62	2,18
1,59	2,15
1,45	2,02
1,44	2,00
1,28	1,83
1,25	1,82
1,12	1,67
1,10	1,67
0,96	1,50
0,95	1,48
0,79	1,33
0,84	1,33
0,66	1,15
0,64	1,15

D₃ – Pêssego (30°C) (continuação).

Potencia (N.m/s)	Rotação (1/s)
0,53	1,00
0,44	0,90
0,40	0,82
0,33	0,73
0,29	0,67
0,24	0,57
0,22	0,48
0,20	0,40
0,20	0,33
0,09	0,12
0,09	0,12
0,08	0,12

D₄ – Goiaba (30°C).

Potencia (N.m/s)	Rotação (1/s)
0,10	0,67
0,15	0,75
0,18	0,82
0,21	0,93
0,23	1,00
0,33	1,10
0,46	1,15
0,52	1,27
0,51	1,33
0,74	1,43
0,88	1,48
0,97	1,60
0,99	1,67
1,38	1,78
1,61	1,82
1,72	1,95
1,69	2,00
2,32	2,12
2,42	2,15

D₄ – Goiaba (30°C) (continuação).

Potencia (N.m/s)	Rotação (1/s)
2,62	2,28
2,72	2,33
3,41	2,47
3,76	2,48
3,44	2,63
3,30	2,67
3,11	2,52
3,03	2,48
2,73	2,35
2,71	2,33
2,41	2,18
2,42	2,15
1,85	2,00
1,67	2,00
1,48	1,83
1,50	1,82
1,01	1,67
0,97	1,67
0,88	1,50
0,86	1,48
0,51	1,33
0,46	1,33
0,40	1,15
0,35	1,07
0,21	1,00
0,17	0,90
0,15	0,82
0,12	0,73
0,07	0,67