

MISTURADOR PARA A ANÁLISE DE PROPRIEDADES REOLÓGICAS¹

FLÁVIA QUEIROZ COSTA²; JOSÉ ANGELO CAGNON³ & NEUSA MARIA PAVÃO BATTAGLINI⁴

RESUMO: Este estudo teve como objetivo avaliar o uso de um misturador para determinação de propriedades reológicas de fluidos. O misturador analisado era composto por um tanque de agitação e por um impelidor do tipo âncora. Os ensaios foram feitos com os fluidos: mel e sucos de laranja, de goiaba e de pêssego. A caracterização reológica foi feita a partir dos dados do torque e rotação requeridos durante a operação de agitação dos fluidos com o misturador. Os ensaios também foram feitos com um viscosímetro rotacional de cilindros concêntricos com as amostras submetidas à várias taxas de deformação e os parâmetros reológicos foram obtidos a partir das curvas de fluxo ajustadas ao modelo da Lei da Potência. As análises dos resultados permitiram concluir que o misturador analisado pode ser usado, dentro de suas limitações, para determinação de propriedades reológicas.

Palavras-chave: Reologia, viscosímetro, fluidos

¹ Parte da dissertação do mestrado do 1º autor intitulada: Verificação de uso de um misturador para análise das propriedades reológicas de produtos alimentícios.

² Aluna do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Energia na Agricultura - Faculdade de Ciências Agrônomicas - FCA/UNESP, Botucatu/SP, Brasil, docente da Universidade do Sagrado Coração - USC -Bauru/SP, Brasil e docente do Colégio Técnico Industrial “Prof. Isaac Portal Roldán” - CTI/UNESP - Bauru/SP - Brasil. fqc@terra.com.br.

³ Orientador e docente do Departamento de Engenharia Elétrica – Faculdade de Engenharia - FE/UNESP–Bauru/SP, Brasil, jacagnon@feb.unesp.br.

⁴ Co-orientadora e docente do Departamento de Física - Faculdade de Ciências - FC/UNESP - Bauru/SP, Brasil, neusapb@fc.unesp.br.

MIXER FOR THE ANALYSIS OF RHEOLOGICAL PROPERTIES

SUMMARY: *This study aimed to evaluate the use of a mixer to determine the rheological properties of fluids. The mixer is comprised of an agitation tank and an anchor type impeller. The tests were performed with honey and fruit juices (orange, guava and peach). The rheological characterization was performed using data from the torque and rotation speed required for the operation of fluid agitation. Tests were also made with a concentric cylinder rotational viscometer with the samples being subjected to various shear rates. The rheological parameters were obtained from the flow curves fitted to the power law model. Analyses of results showed that the mixer can be used, within its limitations, to determine rheological properties.*

Keywords: *Rheology, viscometer, fluid.*

1 INTRODUÇÃO

Os viscosímetros misturadores são pouco comuns, mas com grande aplicação nas indústrias de alimentos. Com o uso de um impelidor adequado, pode-se evitar a desvantagem do pequeno espaço da câmara de um viscosímetro rotacional de uso comum e minimizar os efeitos da sedimentação e da separação dos produtos (RAO, 1975). Esse tipo de viscosímetro, de acordo com Steffe (1992), é muito utilizado nas indústrias de alimentos para a avaliação do comportamento de fluidos dependentes do tempo e de fluidos com partículas grandes ou de substâncias que apresentem problemas com sedimentação de partículas. O princípio geral para determinação das propriedades de escoamento baseia-se na leitura do torque no eixo do impelidor em função de sua rotação. A tensão de cisalhamento e a taxa de deformação produzidas durante a operação são, respectivamente, diretamente proporcionais ao torque e a rotação e o índice de escoamento pode ser determinado pela inclinação da reta obtida com os valores do logaritmo do torque e do logaritmo da rotação inseridos em um gráfico de coordenadas cartesianas.

A descrição do comportamento reológico de fluidos é feita por modelos empíricos que relacionam os valores da tensão de cisalhamento e da taxa de deformação. Segundo RAO(1999), o modelo da Lei da Potência representado pela Equação 1 é utilizado para caracterizar fluidos alimentícios devido a sua apli-

cabilidade para uma ampla faixa de taxa de deformação que podem ser obtidos em vários viscosímetros comerciais.

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

onde:

τ : tensão de cisalhamento, Pa,

K : índice de consistência, Pa.sⁿ,

$\dot{\gamma}$: taxa de deformação, 1/s e

n : índice de escoamento.

Para os viscosímetros misturadores, Metzner & Otto (1957), sugeriram que a taxa de deformação média ($\dot{\gamma}_m$) ao redor do impelidor e sua rotação (N) são diretamente proporcionais e representados pela Equação 2:

$$\dot{\gamma}_m = k_s N \quad (2)$$

onde:

$\dot{\gamma}_m$: taxa de deformação média, 1/s,

k_s : constante de proporcionalidade definida experimentalmente, obtida a partir das características físicas do impelidor e do índice de escoamento do fluido agitado e

N : rotação, RPS

O valor de k_s para o impelidor do tipo âncora, segundo Deák et al (1985), pode ser obtido pela Equação 3.

$$k_s = \left[37 - 60 \left(1 - \frac{d}{D} \right) \right] (1 - n) \quad (3)$$

onde:

d : diâmetro interno do impelidor, mm

D : diâmetro externo do impelidor, mm e

n : índice de escoamento do fluido analisado.

Usando-se um misturador, segundo Rao (1999), o índice de consistência (K) de um fluido pode ser determinado pela relação entre o torque (M) e a rotação do impelidor (N) descrita pela Equação 4. Para o emprego da Equação 4, é necessário o conhecimento dos parâmetros reológicos do fluido considerado como padrão.

$$\frac{M_x}{M_y} = \frac{\tau_x}{\tau_y} = \frac{K_x (k_s N_x)^n}{K_y (k_s N_y)^n} \quad (4)$$

onde:

M_x e M_y : torque obtido com o fluido padrão e com o fluido analisado, respectivamente em Kg.m²/s²,

τ_x e τ_y : tensão de cisalhamento no fluido padrão e no fluido analisado, respectivamente em Pa

K_x e K_y : índices de consistências do fluido padrão e do fluido analisado, respectivamente em Pa.sⁿ

k_s : constante de proporcionalidade,

N_x e N_y : rotação do impelidor com o fluido padrão e com o fluido analisado em rps

n_x e n_y : índices de escoamento do fluido padrão e do fluido analisado.

Sendo os parâmetros empíricos, como a viscosidade aparente e a curva reológica dos alimentos, informações importantes no processamento, armazenamento e projetos de equipamentos da indústria alimentícia, este estudo teve como objetivo avaliar o uso de um misturador na determinação de parâmetros reológicos de fluidos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Matérias-primas

As amostras utilizadas foram: suco concentrado de laranja sem adição de açúcar; suco concentrado de goiaba; suco concentrado de pêsego e o mel de abelhas. Os sucos foram os comerciais, provenientes de um mesmo lote de processamento e armazenados a 15°C. O mel foi adquirido diretamente do produtor, de uma mesma florada, e armazenado à temperatura ambiente.

2.2 Medidas Reológicas

Para as medidas reológicas foram utilizados o viscosímetro rotacional de cilindros concêntricos, Brookfield LVDV-II+ e um sistema de agitação ou misturador que foi analisado para ser utilizado como viscosímetro misturador. Os ensaios foram realizados em triplicatas à 30°C. A temperatura dos fluidos durante a operação de agitação foi mantida constante por um banho termostático.

2.2.1. Misturador ou sistema de agitação

O misturador ou sistema de agitação era composto por um tanque, pelo impelidor do tipo âncora colocado centrado e introduzido verticalmente no tanque e por uma unidade de medidas. A Figura 1 mostra o misturador e o impelidor do tipo âncora. Os dados referentes à geometria do impelidor e do misturador estão nas Tabelas 1 e 2 respectivamente. O tanque de agitação tinha uma jaqueta de condicionamento térmico com circulação externa para um banho termostático que mantinha a temperatura de trabalho definida pelo operador e indicada por um termopar colocado no interior da amostra. A unidade de medida fornece as mudanças do valor do torque obtido indiretamente no eixo do impelidor. O sistema era interligado a um programa computacional que registrava os dados de forma automática, construía gráficos e tabelas, eliminando assim, erros operacionais e de registros e fornecia instantaneamente as curvas de fluxo de viscosidade, da rotação e do torque.

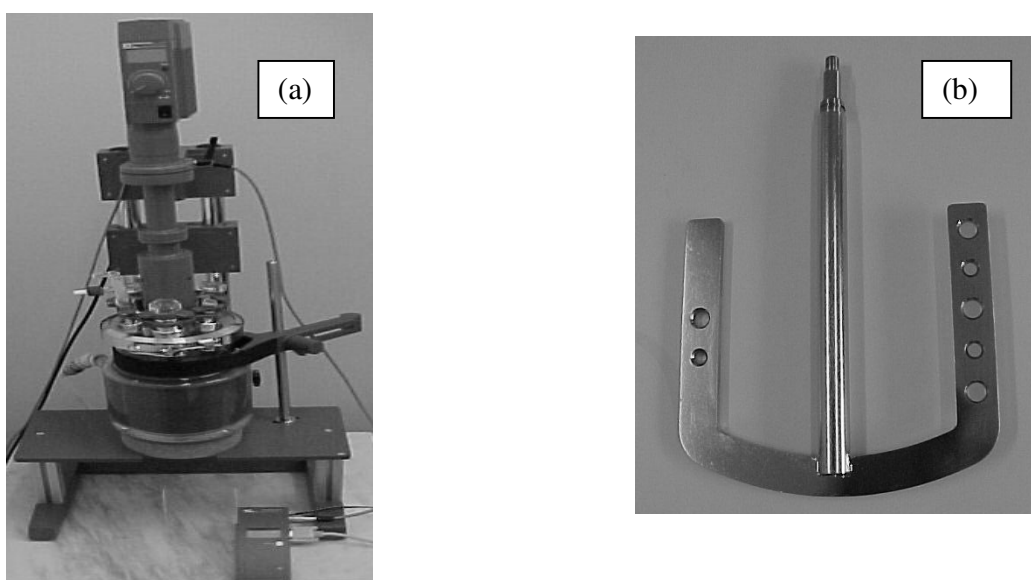


Figura 1 - (a) Sistema de agitação; (b) Impelidor: âncora

Tabela 1 - Dimensões do impelidor do tipo âncora.

diâmetro (mm)	140
altura (mm)	126
(diâmetro do impelidor / diâmetro do tanque): d/D	0,93
espaçamento entre o impelidor e o tanque: $c = (D - d)/2$ (mm)	5

Tabela 2 - Características do misturador ou sistema de agitação analisado.

volume útil (l)	2,0
temperatura máxima de trabalho (C)	230
pressão máxima (bar)	1
vácuo (mbar)	25
faixa de rotação (1/s)	0,13 – 4,83
diâmetro interno do tanque (mm)	150
altura do costado (mm)	210
Superfície de troca térmica	Jaqueta
Impelidor	Âncora plana

2.2.2. Viscosímetro rotacional

O viscosímetro rotacional usado da marca *Brookfield* modelo LVDV-II + fornecia medidas da tensão de cisalhamento, da viscosidade e da taxa de deformação, foi acoplado a um programa computacional para coleta e processamento dos dados e mantinha a temperatura das amostras analisadas por um sistema de banho termostático. Nos ensaios foi utilizado o sensor LV - SC4-31. Os dados obtidos com esse viscosímetro foram tomados como padrão para análise do misturador.

2.3. Obtenção dos dados experimentais

As amostras de mel, dos sucos concentrados de laranja, de goiaba e de pêssego foram colocadas, separadamente, no tanque do misturador, mantidas à 30°C e o sistema colocado em operação com a rotação variando de 30 rpm à 210 rpm. Inicialmente aumentou-se a rotação em etapas regulares, com os tempos iguais de operação para cada rotação, até um valor máximo e, então procedeu-se a diminuição da rotação da mesma maneira. As leituras dos valores experimentais correspondentes a cada rotação foram efetuadas intermitentemente. Os ensaios foram realizados em triplicatas.

Com os valores experimentais do torque requerido na agitação de cada fluido nas várias rotações, foram construídas as curvas dos gráficos do logaritmo do torque em função do logaritmo da rotação. O coeficiente de inclinação das retas forneceu o índice de escoamento dos fluidos. A classificação reológica dos fluidos foi feita a partir da análise do reograma obtido com os valores do torque em função da rotação.

Os ensaios realizados com o viscosímetro rotacional *Brookfield* foram feitos a várias taxas de deformação que variaram de 0,20 à 65 s⁻¹. Os fluidos foram colocados no recipiente de condicionamento do viscosímetro e mantidos em banho térmico à 30°C e os ensaios realizados em triplicatas. Com os valores da tensão de escoamento e da taxa de deformação foi construída a curva de fluxo para cada fluido. As curvas foram ajustadas, por regressão linear, ao modelo da Lei da Potência, representada pela Equação 1.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização reológica usando o misturador

A Figura 2 mostra as curvas construídas a partir dos dados obtidos com o misturador para as quatro amostras em rotações crescentes e decrescentes. Considerando que a equação $\dot{\gamma}_m = k_s N$ utilizada por Metzner & Otto (1957) indica que a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) é diretamente proporcional à rotação (N) e que a expressão $\tau = (constante)(M)$ apresentada por Steffe (1992) onde a tensão (τ) é diretamente proporcional ao torque (M). As características de comportamento de fluxo analisadas nos gráficos da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação, podem, também ser analisadas com os gráficos do torque em função da rotação. A representação gráfica do torque em função da rotação da Figura 2 foi obtida aumentando a rotação em intervalos definidos até um valor máximo e, então diminuindo com os

mesmos intervalos até o valor mínimo de rotação. As flechas indicam o aumento e a diminuição da rotação em ensaio contínuo.

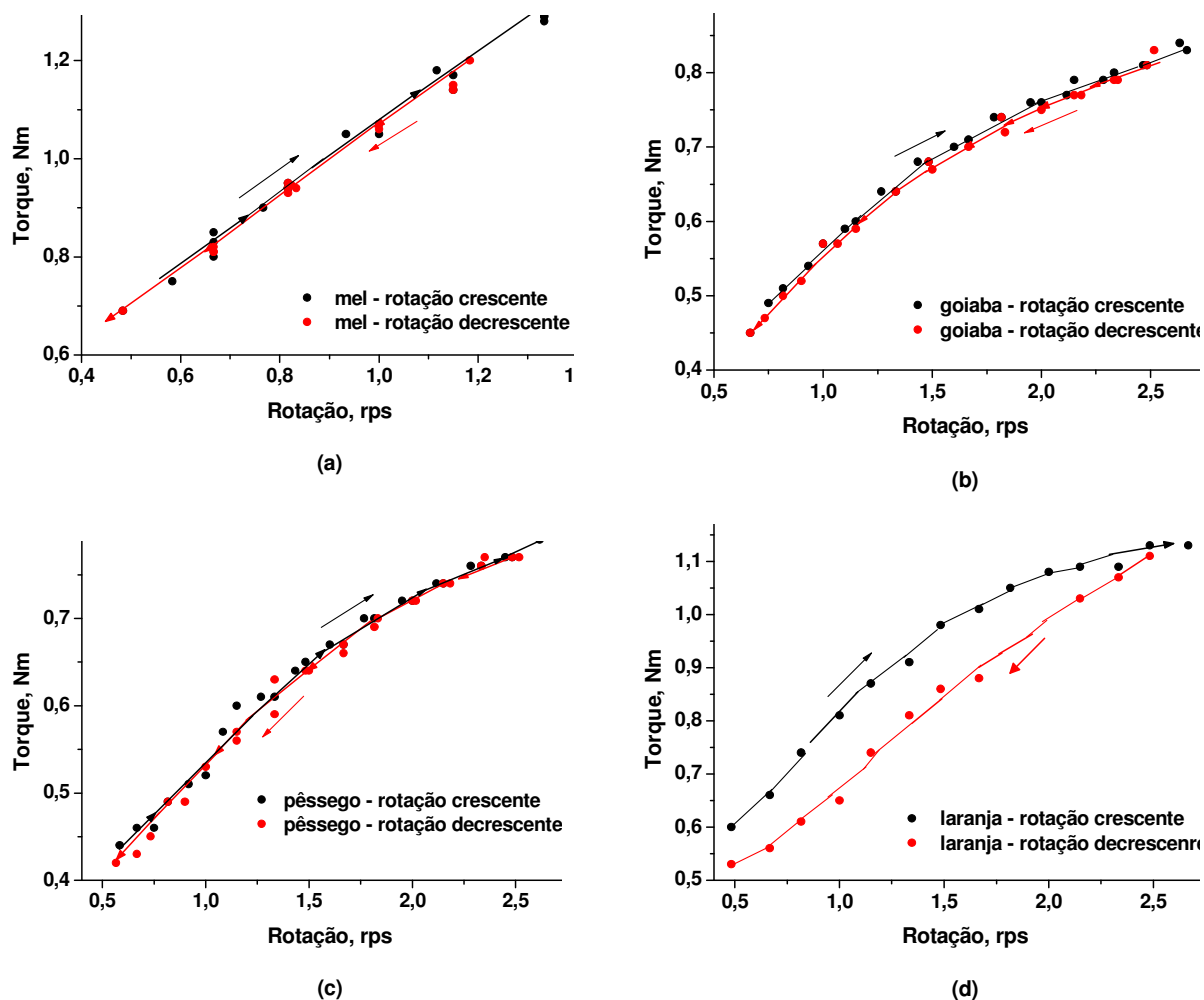


Figura 2 – Torque em função da rotação: a) mel; b) suco de goiaba; c) suco de pêssigo; d) suco de laranja.

As Figuras 2a, 2b e 2c correspondentes ao mel, sucos de goiaba e de pêssigo mostram as curvas ascendentes e descendentes, dentro dos erros experimentais sobrepondo-se, indicando comportamento reológico independente do tempo enquanto que a Figura 2d, mostra a curva de histerese, ou seja, a curva da ida não coincidindo com a curva da volta característica do comportamento de dependência do tempo. As curvas da Figura 2a apresentam uma relação linear entre o torque e a rotação característica do comportamento newtoniano, enquanto que as curvas da Figura 2b, 2c e 2d não apresentam essa relação de lineari-

dade caracterizando portanto, o comportamento reológico não-newtoniano dos sucos de goiaba, pêsego e laranja.

A Figura 3 mostra as curvas da viscosidade em função da rotação crescente e decrescente. As setas indicam a tomada dos dados ao longo do tempo.

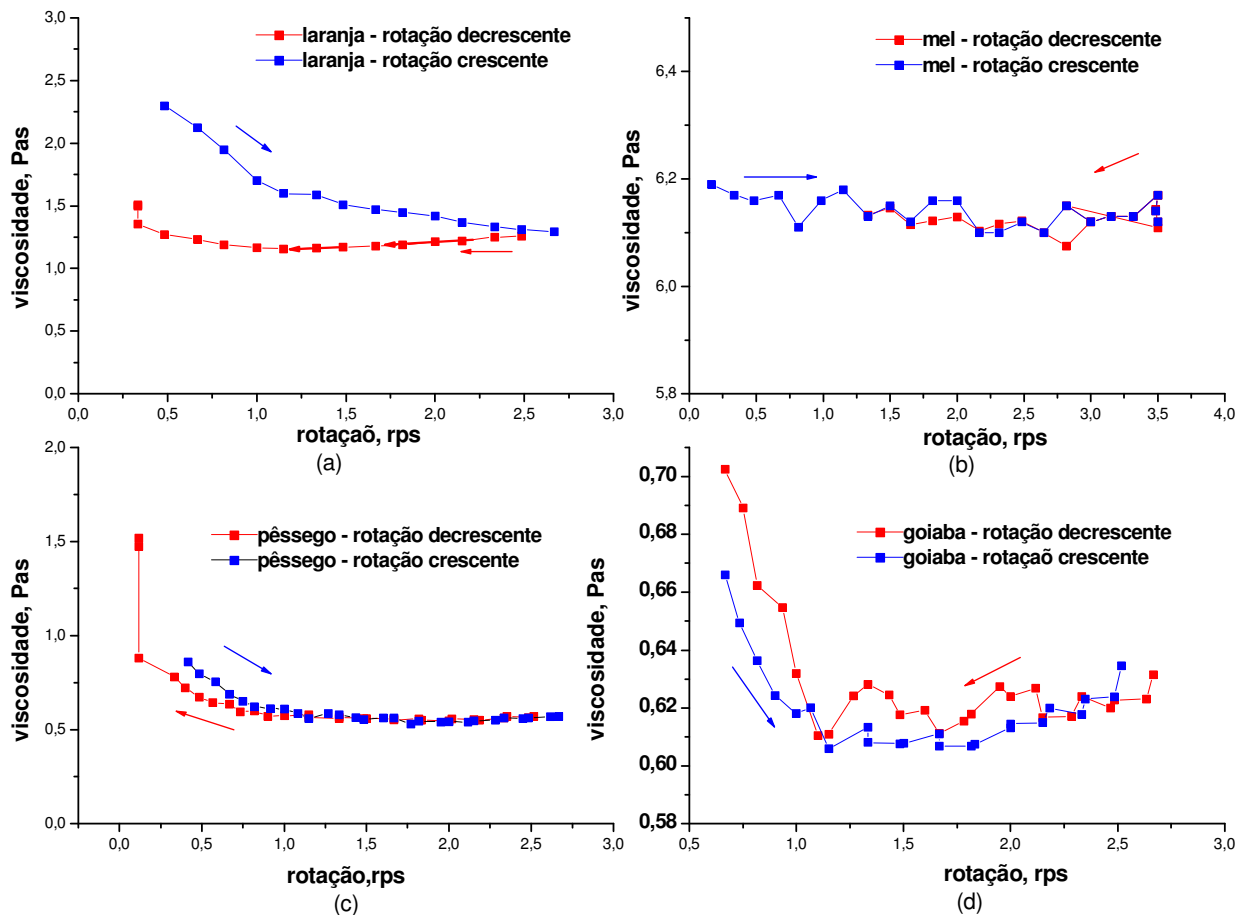


Figura 3 - Viscosidade em função da rotação.

As curvas da Figura 3b, dentro dos erros experimentais, mantêm-se num valor constante com a variação da rotação, caracterizando o comportamento newtoniano do mel. Como a viscosidade é uma constante, somente com uma determinação dessa constante é suficiente para caracterizar completamente o comportamento de fluxo desse fluido. Na literatura encontram-se vários autores como: Steffe (1992), Rao (1999) e Muller (1973) que classificam o mel como newtoniano.

As curvas das Figuras 2b, 2c e 2d não são linhas retas, mostram uma diminuição progressiva na inclinação. Essa inclinação é definida como viscosidade aparente. Os valores do torque aumentam numa proporção menor que o aumento da rotação, de maneira que a viscosidade aparente diminui quando a rotação aumenta. As curvas da Figura 3a, 3c e 3d confirmam a dependência da viscosidade com a rotação e mostram que a viscosidade diminui com o aumento da rotação, comportamento característico de fluidos não-newtonianos pseudoplásticos. Schramm (2006). Toralles, Vendruscolo e Vendruscolo (2006) analisaram o purê de pêssego e Vasques (2003) e Ferreira *et al.* (2002), o suco de goiaba, classificando-os como pseudoplásticos independentes do tempo.

A representação gráfica da Figura 3a é semelhante ao comportamento reológico pseudoplástico em que a viscosidade aparente diminui com o aumento da rotação, porém quando diminui a rotação os valores da viscosidade não retornam aos mesmos valores correspondentes às rotações iniciais. O reograma da Figura 2d mostra a curva de histerese, característica de materiais tixotrópicos. Os reogramas das Figuras 2d e 3a indicam que o suco concentrado de laranja apresentou um comportamento similar ao pseudoplástico, porém dependente do tempo de cisalhamento, portanto classifica-se como tixotrópico.

3.2. Determinação das constantes reológicas usando o misturador

Modelos matemáticos que relacionam a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação são usados para descrever as propriedades de escoamento dos fluidos como o modelo da Lei da Potência, expresso pela Equação (1). A constante reológica (K) é uma medida da consistência do fluido, de tal modo que, quanto maior o seu valor, tanto mais viscoso é o fluido, e a constante (n) é indicativa do grau de afastamento do comportamento do fluido em relação ao do newtoniano e é, também, chamada de constante reológica não-newtoniana ou índice de escoamento.

O índice de escoamento pode ser determinado, segundo Steffe(1992), pela inclinação da reta obtida do gráfico do logaritmo do torque em função do logaritmo da rotação. A Figura 4 mostra as curvas construídas a partir dos logaritmos do torque e da rotação.

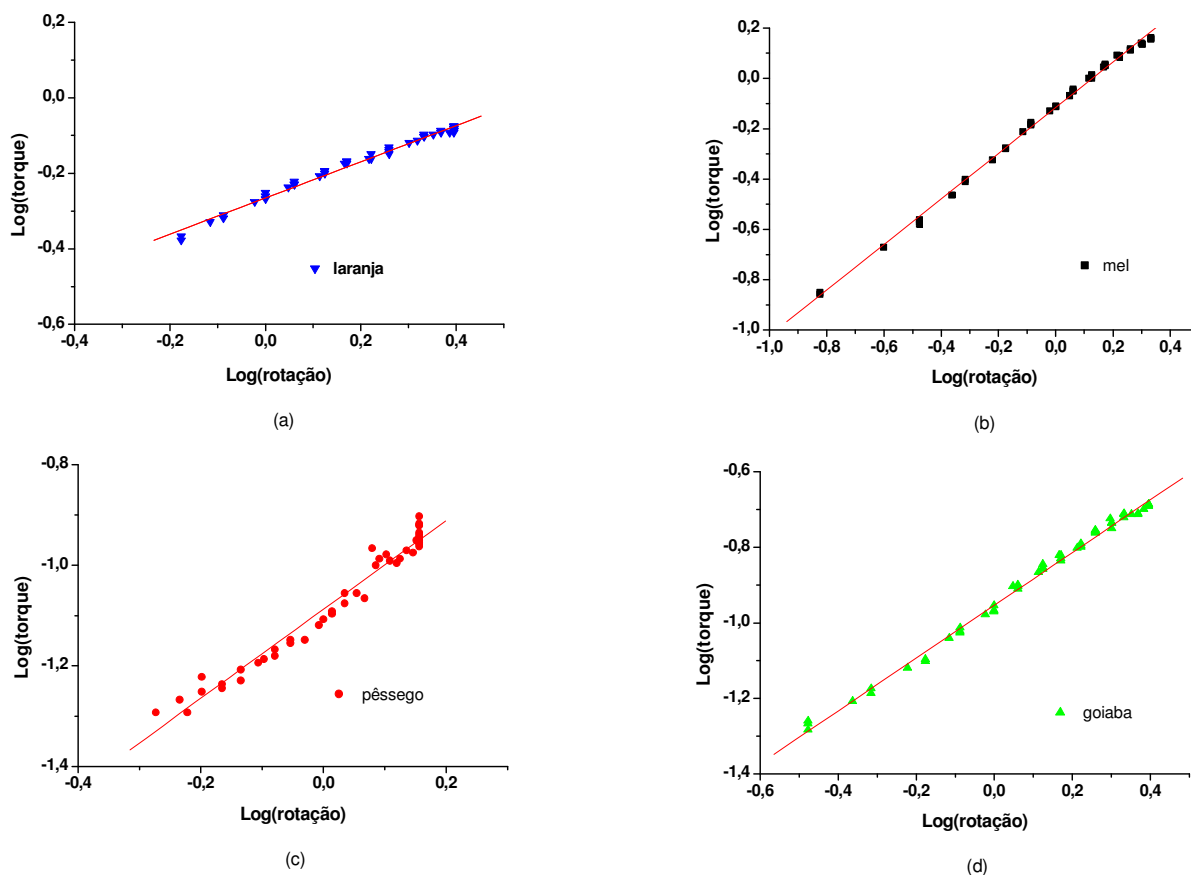


Figura 4 - Gráfico do logaritmo do torque em função do logaritmo da rotação obtido com o misturador: a) laranja; b) mel; c) pêssego; d) goiaba.

As relações matemáticas obtidas por regressão linear às curvas da Figura 4 e os valores dos coeficientes de determinação (R^2) estão na Tabela 3. Na Tabela 4 estão os valores dos parâmetros reológicos de escoamento e de consistência para os fluidos independentes do tempo para o intervalo experimental medido. Os índices de consistência (K) foram calculados pela equação (4) adotando como padrão o mel cujos parâmetros reológicos (n e K) foram obtidos com o viscosímetro *Brookfield* e o torque correspondente a cada rotação utilizada em sua agitação. O índice de consistência do mel foi de 6,09. O índice de consistência não foi calculado pelo misturador porque o mel foi tomado como padrão

Tabela 3 – Relações matemáticas entre o torque e rotação obtidos com o misturador.

	Relações	R ²
mel	$M = 0,77 R^{0,91}$	0,99872
suco concentrado de Pêssego	$M = 0,08 R^{0,87}$	0,98525
suco concentrado de Goiaba	$M = 0,11 R^{0,72}$	0,99752

Tabela 4 – Constantes reológicas determinadas com o misturador.

	n (índice de escoamento)	índice de consistência (K)
mel	0,91	
suco concentrado de pêssego	0,87	0,12
suco concentrado de goiaba	0,72	0,32

3. 3. Caracterização reológica usando o misturador

Quando o índice de escoamento (n) da Lei da Potência é igual a 1, o fluido é newtoniano e o valor da constante de consistência (K) corresponde à viscosidade. Para n<1, o fluido apresenta comportamento pseudoplástico. A Tabela 5 mostra a classificação reológica dos fluidos analisados.

Tabela 5 – Caracterização reológica dos fluidos feita com o misturador.

	Índice de escoamento (n)	Índice de consistência (K) (Pa.s ⁿ)	Classificação
mel	0,91		newtoniano
suco concentrado de pêssego	0,87	0,12	pseudoplástico
suco concentrado de goiaba	0,72	0,32	pseudoplástico
suco concentrado de laranja			tixotrópico

3.4. Caracterização reológica usando o viscosímetro Brookfield

A Figura 5 mostra os reogramas do mel e dos sucos de laranja, de pêsego e de goiaba.

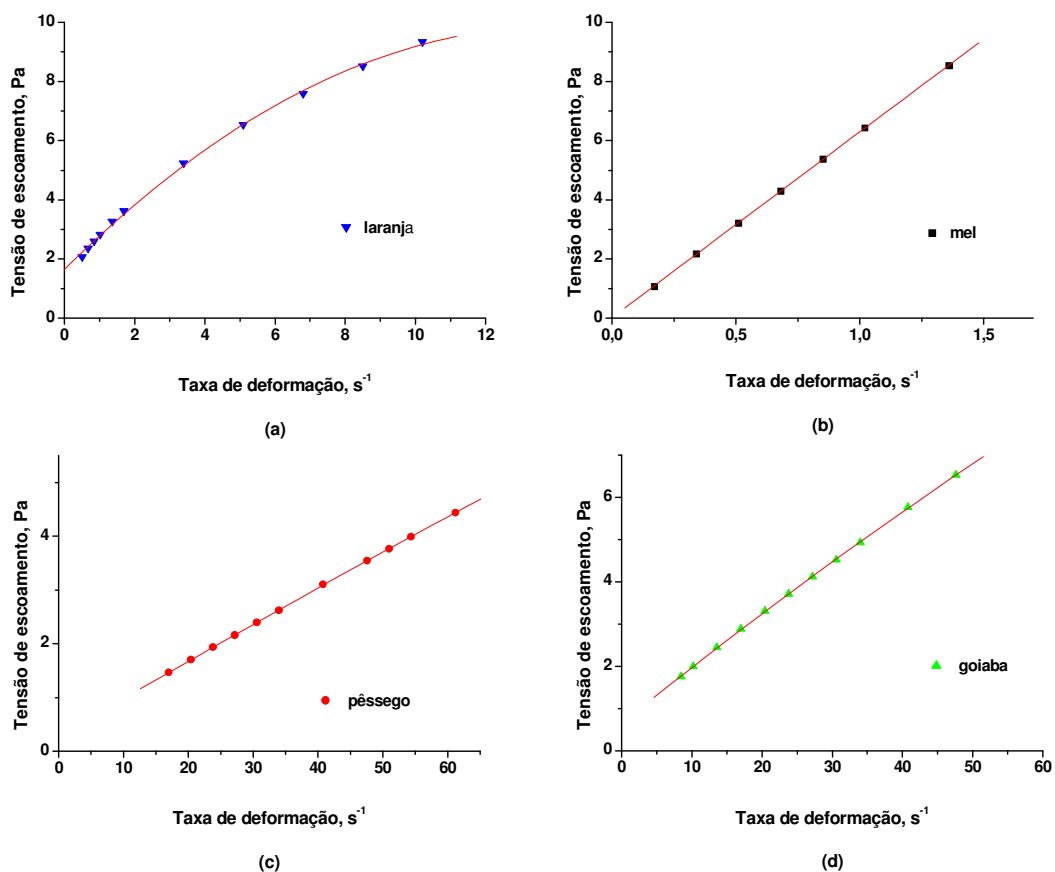


Figura 5 – Gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação

As curvas da Figura 5 foram ajustadas ao modelo matemático da Lei da Potência representado pela equação (1). Os pontos representam os dados experimentais e as linhas contínuas correspondem os ajustes ao modelo da Lei da Potência. A Tabela 6 mostra as equações correspondentes ao ajuste feito por regressão linear.

Tabela 6 - Relações matemáticas entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação.

	Relações	R ²
mel	$\tau = 6,09 \dot{\gamma}^{0,99}$	1,00
suco concentrado de pêssego	$\tau = 0,12 \dot{\gamma}^{0,87}$	1,00
suco concentrado de goiaba	$\tau = 0,34 \dot{\gamma}^{0,76}$	1,00

Quando o índice de escoamento (n) da Lei da Potência é igual a 1, o fluido é newtoniano e o valor da constante de consistência (K) corresponde a viscosidade. Para $0 < n < 1$, o fluido apresenta comportamento pseudoplástico. Pela análise dos modelos, pode-se concluir que o mel comportou-se como fluido newtoniano, os sucos de pêssego e de goiaba apresentaram comportamento pseudoplástico.

3.4 Análise do misturador

A Tabela 7 mostra a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação das amostras a partir dos dados obtidos com o viscosímetro rotacional *Brookfield* e com o misturador.

Tabela 7– Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação.

	Misturador	Viscosímetro Brookfield
mel		$\tau = 6,09 \dot{\gamma}^{0,91}$
suco concentrado de goiaba	$\tau = 0,32 \dot{\lambda}^{0,72}$	$\tau = 0,34 \dot{\gamma}^{0,76}$
suco concentrado de pêssego	$\tau = 0,12 \dot{\lambda}^{0,87}$	$\tau = 0,12 \dot{\lambda}^{0,87}$

A Tabela 8 resume os valores dos índices de escoamento e de consistência para os fluidos em teste utilizando os viscosímetros *Brookfield* e o misturador. O erro percentual foi calculado em relação ao valor obtido com o viscosímetro *Brookfield*.

Tabela 8 – Parâmetros reológicos obtidos com o misturador e com o viscosímetro rotacional *Brookfield*.

	Índice de escoamento			Índice de consistência		
	Misturador	Viscosímetro Brookfield	Desvio percentual	Misturador	Viscosímetro Brookfield	Desvio percentual
mel	0,91	0,99	7,8 %	6,09		
suco de pêssego	0,87	0,87	0,0%	0,12	0,12	0,0%
suco de goiaba	0,72	0,76	5,3 %	0,32	0,34	5,8%

Os parâmetros reológicos determinados com o misturador e com o viscosímetro Brookfield apresentaram boa aproximação, entretanto os resultados são específicos dos instrumentos utilizados, não nos permite apontar qual o melhor procedimento.

4 CONCLUSÕES

Os reogramas construídos com o misturador e com o viscosímetro Brookfield mostraram que o mel exibiu características de fluidos newtonianos, o suco de laranja, características de fluidos não-newtonianos dependente do tempo com características tixotrópicas e os sucos de goiaba e de pêssego apresentaram comportamento não-newtoniano de tempo independente classificado como pseudoplástico.

As análises dos resultados permitiram concluir que o misturador pode ser usado, dentro de suas limitações, para a caracterização reológica.

5 REFERÊNCIAS

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

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

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

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

RAO, M. A. Measurement of flow properties of food suspensions with a mixer, **Journal of texture Studies**, New York, v 6, p. 533-539, 1975.

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

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

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

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.

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