

CONIC SEMESP

16º Congresso Nacional de Iniciação Científica

TÍTULO: REOLOGIA DE FLUIDOS ALIMENTÍCIOS

CATEGORIA: CONCLUÍDO

ÁREA: ENGENHARIAS E ARQUITETURA

SUBÁREA: ENGENHARIAS

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA

AUTOR(ES): CLARISSA DOMINGUEZ SCHMIDT FELIPPE, BIANCA DA SILVA CRUZ, BRUNO ANDRÉ BORGES DE MACEDO

ORIENTADOR(ES): DEOVALDO DE MORAES JÚNIOR, VITOR DA SILVA ROSA

COLABORADOR(ES): MARCO CESAR DIAS MATOS

Realização:

SEMESP 
sindicato das mantenedoras de ensino superior

Apoio:


ISO 9001 **ENIAC**
Educação Básica e Superior

1) Resumo

O estudo do comportamento reológico dos fluidos, com os quais trabalham as indústrias, é imprescindível para que possam mitigar os erros de projetos e de processos, como dimensionamento de bombas, tubulações e evaporadores. Além do interesse relacionado ao projeto de equipamentos de processo, a reologia na indústria de alimentos também é aplicada na caracterização física de alimentos sólidos, líquidos ou pastosos; no desenvolvimento ou reformulação de novos produtos; no controle de qualidade; na obtenção de informações sobre a estrutura dos materiais; e na correlação de variação da textura. A maioria dos fluidos na indústria de alimentos apresenta comportamento não-newtoniano, na qual a viscosidade pode variar com o tempo e com as condições de escoamento. O presente trabalho realizou a caracterização reológica de cinco fluidos: leite condensado, leite de coco, ketchup, mel e xarope de glicose. Em duas diferentes temperaturas (25 e 40°C) mantidas através de banho termostaticado. Os ensaios foram realizados em um reômetro Brookfield, do modelo DV-III, com geometria de cilindros concêntricos. O *software* empregado para análise dos resultados foi o Minitab[®], que gerou regressões moldadas de acordo com os modelos de Herschel-Bulckley e Newton (Lei da potência), obtendo-se os parâmetros reológicos K e n através do modelo que mostrou o melhor ajuste aos resultados. Os três modelos adotados foram bem ajustados aos comportamentos apresentados pelos fluidos. Analisando os reogramas gerados, pôde-se concluir que o modelo de Lei da Potência foi bem ajustado tanto para fluidos newtonianos ($n=1$) como para não newtonianos do tipo tixotrópico (àqueles que apresentam área de histerese). Já o modelo de Herschel-Bulckley, foi bem adaptado ao comportamento pseudoplástico com tensão inicial ($n<1$). Foi observado, também, que as amostras, quando aquecidas, tendiam a assemelhar-se aos fluidos newtonianos, por ter sua consistência relativamente diminuída, apresentando, então, uma menor resistência ao escoamento.

Palavras-chave: reologia, fluidos alimentícios, newtonianos, não newtonianos.

2) Introdução

A Reologia é uma área da física que analisa a deformação mecânica de um material provocada pela aplicação de forças. O escoamento de um fluido é caracterizado por leis que descrevem a variação contínua da taxa ou grau de deformação em função da tensão aplicada (MACHADO, 2002).

A Lei de Newton para a viscosidade se restringe apenas aos fluidos newtonianos, como por exemplo, a água, os quais apresentam uma relação linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento, sendo que esta relação é dada pela viscosidade dinâmica, a qual é constante, variando apenas com a temperatura. Entretanto, existem fluidos que apresentam comportamento distinto do previsto por Newton, sendo que, tais fluidos são denominados de não newtonianos. Nesses fluidos, a viscosidade deixa de ser uma constante para se tornar uma propriedade dependente das taxas de cisalhamento e da temperatura, passando, então, a ser chamada de viscosidade aparente (η) (CANEDO, 2010). Os fluidos não newtonianos são classificados em três grandes grupos: a) independentes do tempo; b) dependentes do tempo e c) viscoelásticos.

Os fluidos independentes do tempo são caracterizados por sua viscosidade aparente variar apenas com a taxa de cisalhamento e a temperatura. Estes são os pseudoplásticos, dilatantes e plásticos de Bingham. A viscosidade, nos dilatantes, tende a crescer com a taxa de deformação e decrescer nos pseudoplásticos (ambos podem apresentar uma tensão inicial, sendo então chamados de Herschel-Buckley) (TADINI *et al*, 2016). Já os plásticos de Bingham, apresentam uma tensão inicial, que, após ser rompida, se comportam como fluidos newtonianos mantendo a linearidade entre tensão e taxa, como descrita pela lei de Newton da viscosidade.

As equações 1, 2 e 3 apresentam modelos matemáticos de Potência, Bingham e Herschel-Buckley, respectivamente, expressos em função da viscosidade aparente.

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

$$\eta = K + \frac{\sigma_0}{\dot{\gamma}} \quad (2)$$

$$\eta = K (\dot{\gamma})^{n-1} + \frac{\sigma_0}{\dot{\gamma}} \quad (3)$$

Sendo K ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$) o fator de consistência do fluido, n o índice de comportamento do fluido, σ_0 (Pa) a tensão de cisalhamento inicial e $\dot{\gamma}$ (1/s) a taxa de cisalhamento.

Os fluidos dependentes do tempo são classificados em tixotrópicos e reopéticos. Enquanto que em fluidos tixotrópicos a viscosidade decresce com a taxa de deformação; nos fluidos reopéticos, a mesma aumenta. Estes apresentam o fenômeno conhecido como histerese, que é, para a reologia, a tendência do fluido de voltar ao seu estado físico original após uma crescente aplicação de taxas de cisalhamento. Este fenômeno, comumente observado em fluidos alimentícios, ocorre através da reconstrução molecular, que após o término da aplicação da tensão ou ao final do período de deformação pode apresentar parcial ou completa recuperação da estrutura. No entanto, este retorno ao estado inicial ocorre por outro caminho, sendo este diferente para fluidos tixotrópicos e reopéticos (MACHADO,2002), (TADINI *et al*, 2016). Na Figura 1, pode-se observar o reograma característico de fluidos não newtonianos dependentes do tempo e o fenômeno da histerese:

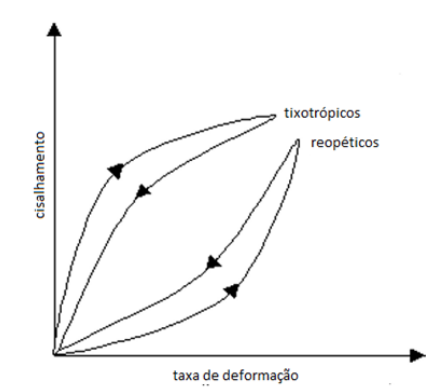


Figura 1 – Comportamento reológico dos tixotrópicos e reopéticos

No projeto dos processos industriais com fluidos alimentícios é importante conhecer o comportamento reológico destes visando mitigar os erros de projetos e assim desenvolver ou reformular novos produtos, objetivando sempre a melhora da qualidade (TADINI *et al*, 2016).

Contudo, mesmo com a importância deste estudo nas indústrias, o mesmo não é realizado integralmente para todos os fluidos alimentícios. Observando-se a literatura, ainda que tratando-se de um mesmo fluido, o comportamento reológico pode variar, o que torna necessário analisar não somente cada fluido como também

as variações dentro de um mesmo produto, levando em conta a marca e produto light e diet.

3) Objetivo

O presente estudo teve por objetivo determinar o comportamento de específicos fluidos alimentícios.

4) Metodologia

Os experimentos foram realizados no laboratório de operações unitárias da Universidade Santa Cecília. Os dados reológicos foram obtidos através de um reômetro Brookfield, do modelo DV-III, conforme apresentado na Figura 2, com geometria de cilindros concêntricos, disposto pela Universidade de São Paulo (USP).



Figura 2 – Reômetro Brookfield DV-III

O reômetro de cilindros concêntricos é um instrumento disponível comercialmente e amplamente utilizado em pesquisas sobre reologia de alimentos, como também na indústria de alimentos. Esse instrumento se caracteriza por conter a amostra em um copo cilíndrico (cilindro externo) e ter um segundo cilindro (cilindro interno ou spindle) (Figura 3), de diâmetro menor, imerso coaxialmente no primeiro. Um dos dois cilindros é forçado a girar com velocidade angular constante e o torque transmitido para o outro cilindro é medido (TADINI *et al*, 2016). O sistema empregado foi do tipo Searle, quando o cilindro interno sofre rotação e o externo permanece em repouso.



Figura 3 – Cilindro e *spindles*

O funcionamento do reômetro baseia-se em preencher o espaço entre os dois cilindros com o produto a ser estudado. Todas as amostras foram submetidas a temperaturas de 25 °C e 40 °C, sendo mantidas através de um banho termostatizado.

A Tabela 1 apresenta a marca, os fluidos e o *spindle* utilizados neste estudo.

Tabela 1: Marcas e *spindle* de acordo com os produtos alimentícios analisados

Marca	Produto	<i>Spindle</i>
Vovô Pedro	Mel	27
Moça	Leite Condensado	27
Moça	Leite Condensado Light	27
Piracanjuba	Leite Condensado	27
Ducoco	Leite de Coco	21
Yoki	Xarope de Glicose	27
Hellmann's	Ketchup	27

5) Desenvolvimento

Os parâmetros reológicos dos fluidos medidos no reômetro são a tensão de cisalhamento, a taxa de cisalhamento e a viscosidade aparente, através da aplicação de uma rotação constante medindo-se o torque. Como as propriedades medidas no reômetro se devem a deformação, o torque medido deve estar dentro da faixa de 20-80% da capacidade de deformação da mola para que os resultados gerados sejam confiáveis.

O reômetro também obedece a algumas especificações do fabricante, como por exemplo, deve-se esperar pelo menos 30 segundos antes de considerarmos os resultados gerados, pois antes deste período, podem haver oscilações consideráveis

da mola. Em virtude da consistência das amostras ser variante, visando obter dados confiáveis no reômetro através do torque, foram utilizados *spindles* com diferentes diâmetros. Cada *spindle* relaciona a taxa de cisalhamento com a rotação escolhida através de uma constante definida pelo fabricante.

Em relação ao torque, fluidos pouco consistentes necessitam de uma área com maior cisalhamento ou um *spindle* com maior diâmetro, visando obter um torque mínimo de 20% e vice-versa com fluidos muito consistentes. Em cada análise era necessário avaliar qual tamanho de *spindle* melhor se enquadraria. Cada *spindle* corresponde a uma constante, calculada pelo fabricante para corrigir o torque e a tensão provocada pelo fluido na parede dos dois cilindros.

Exemplificando, quanto menor a viscosidade, maior será o diâmetro do *spindle* a fim de aumentar a superfície de contato entre fluido e cilindro e, portanto, provocar um torque maior.

O *software* empregado para análise dos dados obtidos foi Minitab[®]. A partir do mesmo, regressões foram geradas a fim de classificar o comportamento reológico dos fluidos. Para tanto, utilizaram-se os modelos de potência e Herschel-Buckley, respectivamente descritos nas equações 6 e 7, respectivamente.

$$\sigma = K \dot{\gamma}^n \quad (6)$$

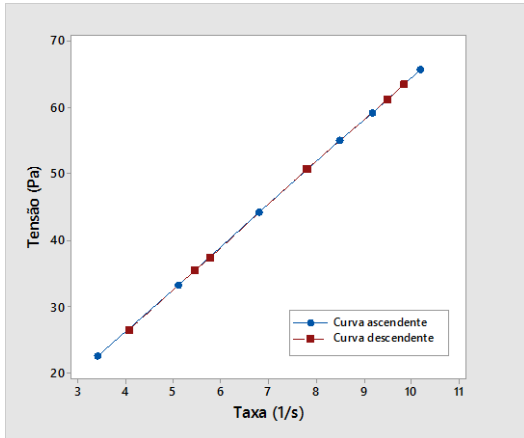
$$\sigma = \sigma_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (7)$$

Visando verificar se os fluidos analisados possuem dependência com o tempo (histerese), os experimentos foram conduzidos com ciclos ascendentes e descendentes na variação da taxa de cisalhamento no reômetro.

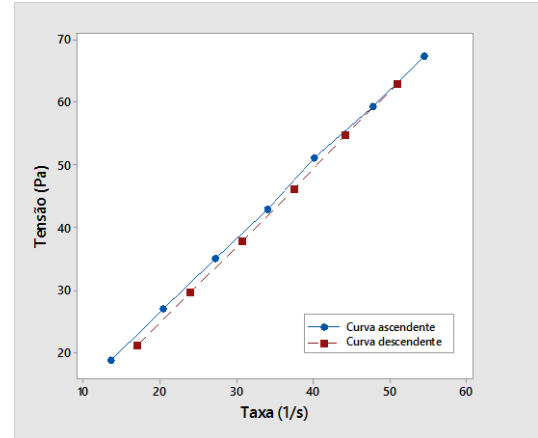
6) Resultados

Com os dados obtidos no reômetro para todos os fluidos nas duas temperaturas estudadas, foram construídos reogramas, relacionando a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, visando analisar o comportamento reológico dos fluidos empregados no estudo.

Inicialmente, foi realizada a análise gráfica do comportamento reológico do mel conforme apresentado nas Figuras 3a e 3b.



(a)

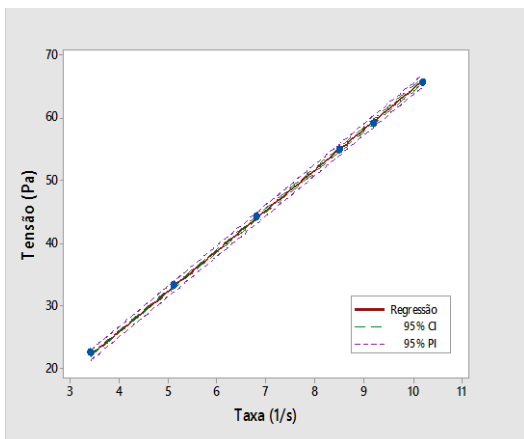


(b)

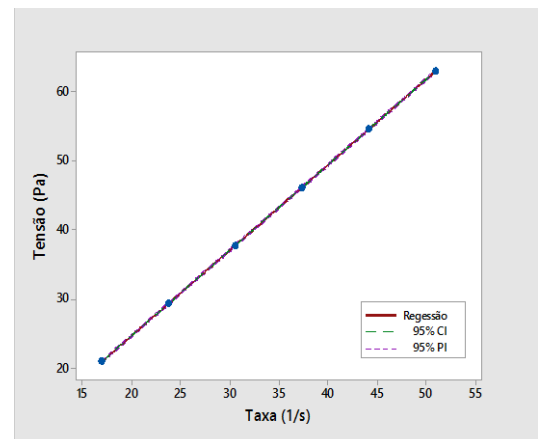
Figura 3 – Comportamento reológico do mel a 25 °C (a) e 40 °C (b).

Pôde-se observar nas Figuras 3a e 3b, que em ambas as temperaturas, o mel é um fluido newtoniano devido a relação linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento, por não apresentar uma tensão inicial de escoamento e uma diferença no ciclo ascendente do descendente.

As Figuras 4a e 4b apresentam as regressões geradas entre a tensão e taxa de cisalhamento para o mel a 25°C e 40°C.



(a)



(b)

Figura 4 – Regressões para o mel a 25 °C (a) e 40 °C (b).

As Figuras 4a e 4b apresentam as regressões geradas para prever o comportamento reológico do mel a 25°C (Equação 7) e a 40°C (Equação 8).

$$\sigma = 6,4697 \dot{\gamma} \quad (7)$$

$$\sigma = 1,23569 \dot{\gamma} \quad (8)$$

De forma análoga ao mel, foram realizadas análises reológicas para os outros fluidos, como por exemplo, na Figura 5 está ilustrado o comportamento do leite de coco a 25°C.

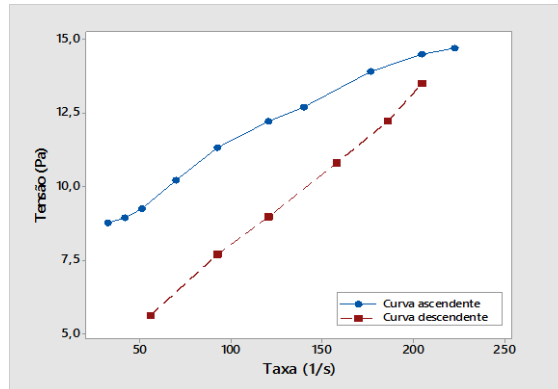


Figura 5 – Comportamento reológico do leite de coco a 25°C

A Tabela 2 apresenta a caracterização reológica de todos os fluidos a 25°C com os seus respectivos modelos constitutivos.

Tabela 2 – Parâmetros reológicos a 25 °C.

Fluido	Comportamento		Modelo	Constantes dos modelos		
				K (Pa.s ⁿ)	n	σ_0 (Pa)
Mel	Ida/volta	Newtoniano	Lei da Potência	6,4697	1	-
Leite Condensado (Moça)	Ida	Tixotrópico	Lei da Potência	9,11314	0,791681	-
	Volta	Newtoniano	Lei da Potência	5,35849	1	-
Leite Condensado light (Moça)	Ida	Tixotrópico	Lei da Potência	9,98423	0,762451	-
	volta	Newtoniano	Lei da Potência	5,35248	1	-
Leite Condensado (Piracanjuba)	Ida	Tixotrópico	Lei da Potência	12,8273	0,636837	-
	volta	newtoniano	Lei da Potência	5,23704	1	-
Leite de Coco	Ida	Tixotrópico	Lei da Potência	2,93235	0,298459	-
	Volta	Tixotrópico	Lei da Potência	0,337189	0,68862	-

Continuação da Tabela 2

Xarope de Glicose	Ida/volta	Newtoniano	Lei da Potência	13,7355	1	-
Ketchup	Ida	Pseudoplástico	Herschel-Bulkley	2,89391	0,819956	43,7308

De forma similar, a Tabela 3 ilustra os mesmos parâmetros a 40°C.

Tabela 3 – Parâmetros reológicos a 40 °C.

Fluido	Comportamento		Modelo	Constantes dos modelos		
				K (Pa.s ⁿ)	n	σ_0 (Pa)
Mel	Ida/volta	Newtoniano	Lei da Potência	1,23569	1	-
Leite Condensado (Moça)	Ida	Tixotrópico	Lei da Potência	3,97115	0,759787	-
	Volta	Newtoniano	Lei da Potência	1,62702	1	-
Leite Condensado light (Moça)	Ida	Tixotrópico	Lei da Potência	5,95771	0,677698	-
	volta	Newtoniano	Lei da Potência	1,87719	1	-
Leite Condensado (Piracanjuba)	Ida	Tixotrópico	Lei da Potência	5,34322	0,677862	-
	volta	Newtoniano	Lei da Potência	1,6829	1	-
Xarope de Glicose	Ida/volta	Newtoniano	Lei da Potência	2,75164	1	-
Ketchup	Ida	Pseudoplástico	Herschel-Bulkley	47,9742	0,140798	*
	Volta	Pseudoplástico	Herschel-Bulkley	48,7094	0,144891	*

(*) Valores irrisórios.

Para a maioria dos fluidos analisados os resultados experimentais corroboraram com a literatura preexistente. Em fluidos considerados newtonianos, n é 1, portanto, o valor de K é numericamente igual a viscosidade dinâmica (μ). No entanto, devido a limitações mecânicas do reômetro e condições de operação, não foi possível analisar o comportamento reológico de dois fluidos. No leite de coco a 40 °C havia restrição no diâmetro dos *spindles* e, mesmo o maior deles não conseguiu atingir uma superfície de contato suficiente para a obtenção de dados, ou seja, o

leite de coco nesta temperatura provou não ter consistência suficiente para efetuar a leitura com sucesso.

O ketchup, quando submetido a 25 °C e taxas decrescentes, apresentou uma reologia distinta daquela esperada, devido a provável existência de bolhas de ar que causaram perturbações na leitura. Este mesmo fluido a 40 °C fica menos viscoso, apresentando, portanto, uma tensão inicial irrisória a ponto de ser indetectável pelo reômetro, já que o mesmo não gera valores confiáveis a torques inferiores a 20%.

7) Considerações finais

Concluiu-se que os reogramas apresentados mostram que a maioria das amostras apresentou uma relação não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, exceto mel e xarope de glicose em ambas as temperaturas e certos fluidos quando aquecidos. Isso ocorre porque ao aumentar a temperatura, o fluido se torna menos viscoso, assemelhando-se, assim, a fluidos newtonianos.

Os modelos reológicos de Herschel-Bulkley e Lei da Potência, utilizados para o ajuste dos dados experimentais, mostraram-se adequados. O efeito de histerese foi observado para as amostras de leite de coco e leite condensado, mostrando a dependência do fluido com o tempo. A amostra de ketchup apresentou valores de índice de comportamento (n) inferiores a um, caracterizando o comportamento pseudoplástico, porém com tensão inicial, passando a ser chamado de Herschel-Bulkley, visto que a viscosidade das amostras diminuiu com as taxas de deformação aplicadas.

8) Fontes Consultadas

CANEDO, E. L. Fenômenos de Transporte. Rio de Janeiro, RJ. Editora LTC, 2010.

MACHADO, J. C. V. Reologia e escoamento de fluidos. Rio de Janeiro, RJ. Interciência: Petrobrás, 2002.

TADINI, C. C.; TELIS, V. R. N.; MEIRELLES, A. J. de A.; PESSOA, P. de A. F. Operações Unitárias na Indústria de Alimentos 1 . 1ª ed. São Paulo, SP. Editora LTC, 2016.