

APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR NA ESTIMATIVA DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO DE FLUXO VISCOSO DO ÓLEO LUBRIFICANTE SAE 10

César Augusto Canciam - E-mail: ccanciam@gmail.com

Resumo: Mudanças na viscosidade dos óleos lubrificantes afetam diretamente a capacidade de lubrificação e proteção das partes móveis de um motor de combustão interna. A energia de ativação de fluxo viscoso indica a sensibilidade da viscosidade devido à mudança de temperatura, de maneira que, quanto maior for a energia de ativação de fluxo viscoso, maior será a influência da temperatura. O objetivo deste trabalho foi estimar a energia de ativação de fluxo viscoso do óleo lubrificante SAE 10 entre 10 e 150°C. Para tanto, foram empregadas as equações de Vogel e de Arrhenius. O valor da energia de ativação de fluxo viscoso foi determinado a partir da análise de regressão linear de dados da viscosidade absoluta em função da temperatura. O valor encontrado foi de 29,4966 kJ.mol⁻¹. Em comparação com outros óleos lubrificantes encontrados na literatura, o óleo lubrificante SAE 10 apresentou o menor valor para a energia de ativação de fluxo viscoso.

Palavras-chave: viscosidade; temperatura; lubrificante; efeito; estimativa.

APPLICATION OF THE LINEAR REGRESSION ANALYSIS IN THE ESTIMATE OF THE ACTIVATION ENERGY FOR VISCOUS FLOW OF THE LUBRICATING OIL SAE 10

Abstract: The change in the viscosity of lubricating oils affect the ability of lubrication and protection from moving parts of an internal combustion engine. The activation energy for viscous flow indicates the sensitivity of the viscosity due to change of the temperature, so that, the greater the activation energy for viscous flow, the greater the influence of temperature. The objective of this study was to estimate the activation energy for viscous flow of lubricating oil SAE 10 between 10 and 150°C. Therefore, the equations of Vogel and Arrhenius were employed. The value of the activation energy for viscous flow was determined from linear regression analysis data of absolute viscosity as function of temperature. The value found was 29.4966 kJ.mol⁻¹. Compared with other lubricants found in the literature, the lubricating oil SAE 10 showed the lowest value for the activation energy of viscous flow.

Keywords: viscosity; temperature; lubricant; effect; estimate.

1. INTRODUÇÃO

O sistema de classificação SAE (realizado pela “Society of Automative Enginners”) é o mais antigo sistema adotado nos óleos lubrificantes automotivos para motor e transmissão. Esse sistema define faixas de viscosidade, não levando em conta os requisitos de desempenho. No caso do óleo lubrificante SAE 10, seu uso é indicado para temperaturas mais altas.

A viscosidade absoluta é a propriedade que determina o grau de resistência do fluido a uma força cisalhante. Vários estudos têm demonstrado que a viscosidade absoluta de um fluido é altamente influenciada por mudanças na temperatura (OLIVEIRA; BARROS; ROSSI, 2009; ÍNDIO DO BRASIL, 2004).

Brunetti (2008) comenta que a viscosidade absoluta é diretamente proporcional à força de atração entre as moléculas. Com o aumento da temperatura, essa força de atração diminui, diminuindo também a viscosidade absoluta. Dessa maneira, observa-se nos líquidos que a viscosidade absoluta diminui com o aumento da temperatura.

A redução da viscosidade absoluta nos líquidos devido ao aumento da temperatura é atribuída ao aumento das distâncias intermoleculares provocadas durante o aquecimento. O aumento das distâncias intermoleculares reduz as forças de atração entre as moléculas, diminuindo a viscosidade absoluta (GRANJEIRO *et al.*, 2007).

Do ponto de vista da lubrificação, o conhecimento do comportamento da viscosidade absoluta com a temperatura é importante, pois essa propriedade influencia consideravelmente as dimensões da espessura mínima do filme lubrificante que promove a separação das superfícies em contato (PROFITO, 2010).

A determinação da viscosidade absoluta nos líquidos tem como base a Teoria do Estado Ativado de Eyring (1941). Essa teoria considera que um líquido é constituído por moléculas intercaladas por posições desocupadas (vacâncias), e essas moléculas, mesmo com o líquido em repouso, movem-se com o propósito de ocuparem as vacâncias adjacentes a elas. A viscosidade absoluta está relacionada com a força que tende a se opor a esse movimento, sendo uma medida da fricção interna do fluido. Dessa maneira, quanto maior a barreira potencial que uma molécula terá que vencer a fim de “saltar” para a vacância adjacente, maior é a viscosidade absoluta. Essa barreira potencial é conhecida como energia de ativação de fluxo viscoso (SILVA; PAREDES; REIS, 2007; RIBEIRO *et al.*, 2005).

Dessa forma, o escoamento de um líquido pode ser considerado um processo térmico em que as moléculas devem exceder a energia de ativação de fluxo viscoso (BRINGEL; SOARES; SOARES, 2009).

Com relação à energia de ativação de fluxo viscoso, essa grandeza indica a sensibilidade da viscosidade absoluta devido à mudança de temperatura, de maneira que, quanto maior for a energia de ativação de fluxo viscoso, maior será a influência da temperatura. Ou seja, alta energia de ativação de fluxo viscoso indica uma mudança mais rápida na viscosidade absoluta com a temperatura (SILVA, 2008; PEREIRA; QUEIROZ; FIGUEIRÊDO, 2003).

Giap (2010) considera que o efeito da temperatura absoluta (T) sobre a viscosidade absoluta (μ) é modelado pela Equação de Arrhenius, conforme a Equação (1).

$$\mu = \mu_{\infty} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \quad (1)$$

Em que E_a corresponde à energia de ativação de fluxo viscoso; R , à constante universal dos gases ideais e μ_{∞} , à viscosidade absoluta quando a temperatura tende ao infinito.

Considerando a Equação de Arrhenius, Flauzino (2007) comenta que o aumento da temperatura absoluta tem efeito de diminuir a viscosidade absoluta do líquido. Já a ordem de grandeza da energia de ativação de fluxo viscoso indica a dependência da viscosidade absoluta com a temperatura absoluta. Dessa forma, os líquidos com alta energia de ativação de fluxo viscoso apresentam grande variação na viscosidade absoluta em função da temperatura absoluta e vice-versa.

Graão, Berto e Silveira Júnior (2004) comentam que a Equação (1) pode ser reescrita na forma de:

$$\ln \mu = \ln \mu_{\infty} + \left(\frac{E_a}{R} \right) \cdot \frac{1}{T} \quad (2)$$

Um gráfico de $\ln \mu$ versus $\frac{1}{T}$, segundo Canciam (2008), fornece uma reta, em que o coeficiente angular é numericamente igual à razão $\left(\frac{E_a}{R} \right)$ e o coeficiente linear, à $\ln \mu_{\infty}$.

O conhecimento da energia de ativação de fluxo viscoso e da viscosidade absoluta quando a temperatura tende ao infinito permite verificar os efeitos da temperatura sobre a viscosidade absoluta, além de modelar matematicamente o comportamento reológico desse fluido (GRATÃO; BERTO; SILVEIRA JÚNIOR, 2004).

Outra equação que correlaciona a viscosidade absoluta com a temperatura é a Equação de Vogel, conforme a Equação (3) (PROFITO, 2010).

$$\mu = a \cdot \exp\left(\frac{b}{T+c}\right) \quad (3)$$

Em que a , b e c correspondem aos coeficientes empíricos.

De acordo com Profito (2010), a Equação (3) apresenta resultados bastante precisos para aplicações em engenharia.

O objetivo deste trabalho foi estimar a energia de ativação de fluxo viscoso do óleo lubrificante SAE 10, a partir das Equações de Vogel e Arrhenius.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 relaciona os valores dos coeficientes empíricos da Equação de Vogel para o óleo lubrificante SAE 10. Esses valores foram obtidos do trabalho de Profito (2010).

Tabela 1 – Valores dos coeficientes empíricos da Equação de Vogel para o óleo lubrificante SAE 10.

Coefficiente	Valor
a	$2,1930 \times 10^{-5}$ Pa.s
b	$1345,420^{\circ}\text{C}$
c	$144,580^{\circ}\text{C}$

Fonte: Profito (2010).

Com base nos dados apresentados na Tabela 1 e a partir da Equação (3), foi calculada a viscosidade absoluta do óleo lubrificante SAE 10. As temperaturas consideradas foram 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 e 150°C . A Tabela 2 relaciona os valores encontrados para a viscosidade absoluta em função da temperatura.

Para a obtenção da razão $\left(\frac{E_a}{R} \right)$ e do parâmetro $\ln \mu_{\infty}$ foi realizada a análise de regressão linear dos dados de $\ln \mu$ versus $\frac{1}{T}$.

Essa análise de regressão linear considerou os valores da viscosidade absoluta (μ) indicados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores encontrados para a viscosidade absoluta do óleo lubrificante SAE 10 em função da temperatura.

Temperatura (°C)	Viscosidade absoluta (Pa.s) (x 10 ⁻²)
10	13,2134
20	7,7865
30	4,8750
40	3,2111
50	2,2078
60	1,5746
70	1,1590
80	0,8766
90	0,6791
100	0,5371
110	0,4327
120	0,3544
130	0,2945
140	0,2479
150	0,2111

Com relação à temperatura, para o cálculo de $\frac{1}{T}$, as temperaturas de 10 a 150°C foram convertidas para a escala de temperatura Kelvin. A relação entre as escalas de temperatura encontra-se indicada pela Equação (4)

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273,15 \quad (4)$$

As Equações (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13) e (14) fazem parte da análise de regressão linear e são adaptações do trabalho de Triola (2008).

$$\frac{E_a}{R} = \frac{(n \cdot C) - D}{(n \cdot F) - G} \quad (5)$$

$$\ln \mu_{\infty} = \frac{(n \cdot F \cdot H) - (D \cdot I)}{(n \cdot F) - G} \quad (6)$$

Em que:

$$C = \sum \left(\frac{1}{T} \cdot \ln \mu \right) \quad (7)$$

$$D = \left[\sum \left(\frac{1}{T} \right) \right] \cdot (\sum \ln \mu) \quad (8)$$

$$F = \sum \left(\frac{1}{T} \right)^2 \quad (9)$$

$$G = \left[\sum \left(\frac{1}{T} \right) \right]^2 \quad (10)$$

$$H = \sum \ln \mu \quad (11)$$

$$I = \sum \left(\frac{1}{T} \right) \quad (12)$$

O coeficiente de correlação (r^2) para a análise de regressão linear dos dados de $\ln \mu$ versus $\frac{1}{T}$ foi obtido através da Equação (13).

$$r^2 = \frac{(n \cdot C) - D}{\sqrt{[(n \cdot F) - G] \cdot [(n \cdot J) - H^2]}} \quad (13)$$

Em que:

$$J = \sum (\ln \mu)^2 \quad (14)$$

Sendo n equivalente ao número de dados amostrais emparelhados.

De acordo com a Tabela 2, o valor para n correspondeu a 15.

A energia de ativação de fluxo viscoso (E_a) foi determinada pela multiplicação da razão $\frac{E_a}{R}$ por R . Para esse cálculo, foi considerado que a constante dos gases ideais (R) é igual a $8,314 \times 10^{-3} \text{ kJ.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 ilustra o gráfico da viscosidade absoluta (μ) versus a temperatura (T), com base nos dados indicados na Tabela 2.

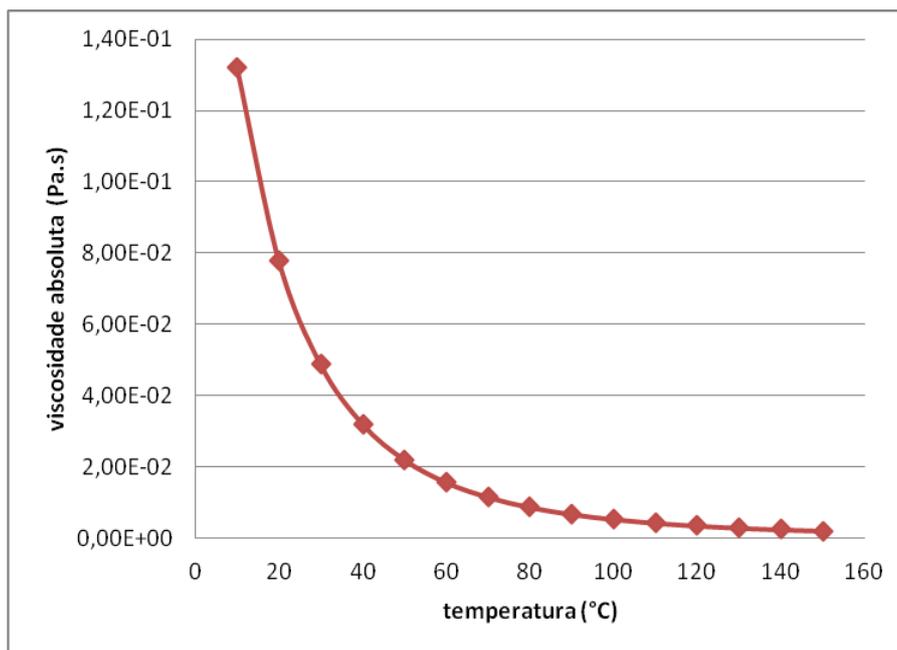


Figura 1 – Gráfico da viscosidade absoluta em função da temperatura para o óleo lubrificante SAE 10.

Na Figura 1 pode-se observar que a viscosidade absoluta do óleo lubrificante SAE 10 tende a sofrer um decréscimo com a elevação da temperatura, variando inversamente com essa grandeza, ou seja, a elevação da temperatura ocasiona a redução na viscosidade absoluta. Tal comportamento também foi observado por Costa (2006) que realizou um estudo da viscosidade absoluta do óleo bruto de duas cultivares de mamona em função da temperatura.

A Tabela 3 indica os resultados obtidos da análise de regressão linear dos dados de $\ln \mu$ versus $\frac{1}{T}$. Enquanto que a Tabela 4 indica os valores da energia de ativação de fluxo viscoso (E_a) e do parâmetro μ_∞ para o óleo lubrificante estudado.

Tabela 3 – Resultados da análise de regressão linear para o óleo lubrificante SAE 10.

Parâmetros	Valores obtidos
$\frac{E_a}{R}$	3547,8195 K
$\ln \mu_\infty$	-14,8534
r^2	0,9036

Tabela 4 – Valores da energia de ativação de fluxo viscoso e da viscosidade absoluta quando a temperatura tende ao infinito para o óleo lubrificante SAE 10.

Parâmetros	Valores obtidos
E_a	29,4966 kJ.mol ⁻¹
μ_∞	3,5420 x 10 ⁻⁷ Pa.s

A Figura 2 ilustra o gráfico dos dados de $\ln \mu$ em função de $\frac{1}{T}$.

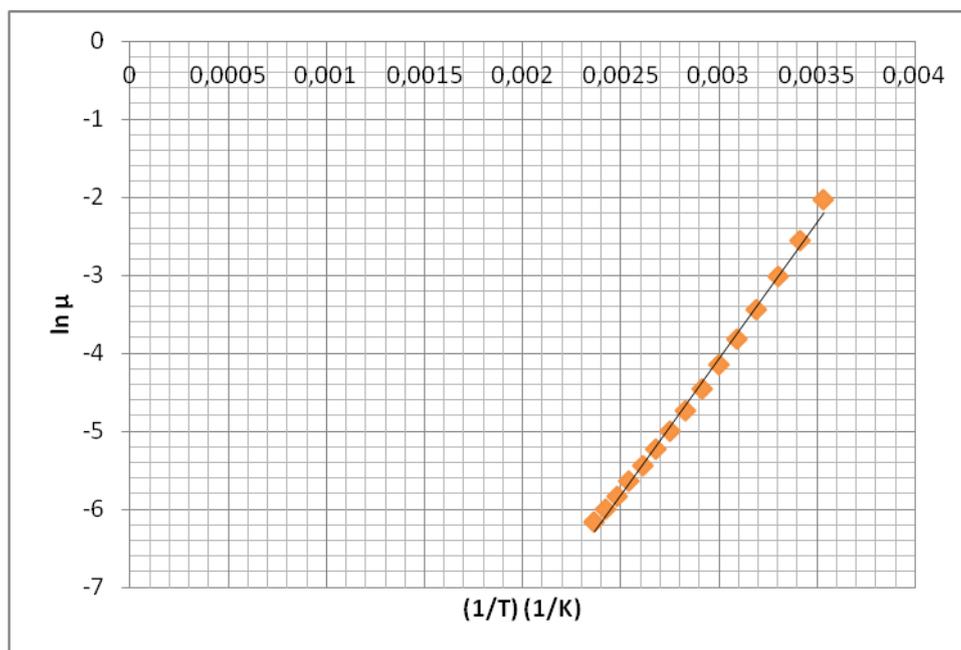


Tabela 5 – Energia de ativação de fluxo viscoso e viscosidade absoluta quando a temperatura tende ao infinito de alguns óleos lubrificantes.

Óleo Lubrificante	Energia de ativação de fluxo viscoso (kJ.mol ⁻¹)	Viscosidade absoluta quando a temperatura tende ao infinito (Pa.s) (x 10 ⁻⁷)	Referência consultada
SAE 20W30	31,1385	4,4535	Canciam (2012a)
SAE 20W40	34,6661	1,8927	Canciam (2012a)
SAE 30	34,7391	1,4256	Canciam (2012b)
SAE 20W50	35,8579	1,7846	Canciam (2012a)
SAE 40	38,1429	0,63432	Canciam (2012b)
SAE 50	39,6802	0,52461	Canciam (2012b)

Dessa forma, os resultados sugerem que para o óleo lubrificante SAE 10, menor é a variação na viscosidade absoluta em função da temperatura e vice-versa, em comparação com os óleos lubrificantes SAE 30, SAE 40, SAE 50, SAE 20W30, SAE 20W40 e SAE 20W50.

O óleo lubrificante SAE 10 por apresentar uma menor energia de ativação de fluxo viscoso em relação aos outros óleos lubrificantes, necessita de uma menor quantidade de energia para se escoar. Assim, é de se esperar que a viscosidade absoluta do óleo lubrificante SAE 10 seja menor em relação aos demais.

A Tabela 6 relaciona a viscosidade absoluta de alguns óleos lubrificantes.

A hipótese de que a viscosidade absoluta do óleo lubrificante SAE 10 é menor em relação a outros óleos lubrificantes fica comprovada através da análise da Tabela 6.

Assim, os resultados sugerem que existe uma correlação entre a energia de ativação de fluxo viscoso e a viscosidade absoluta. De maneira que, para óleos lubrificantes com altos valores de energia de ativação, maior é a viscosidade absoluta.

Com base nos valores da energia de ativação de fluxo viscoso dos óleos lubrificantes SAE 10 (Tabela 4), SAE 30 e SAE 40 (Tabela 5) e suas viscosidades absolutas (Tabela 6), a Figura 3 ilustra a correlação entre a energia de ativação de fluxo viscoso e a viscosidade absoluta (a 38°C).

Tabela 6 – Viscosidade absoluta de alguns óleos lubrificantes.

Classificação	Viscosidade absoluta a 38°C (mPa.s)
SAE 10	0,395
SAE 30	0,967
SAE 40	1,508

Fonte – Departamento de Física – ICE/ UFJF (2013).

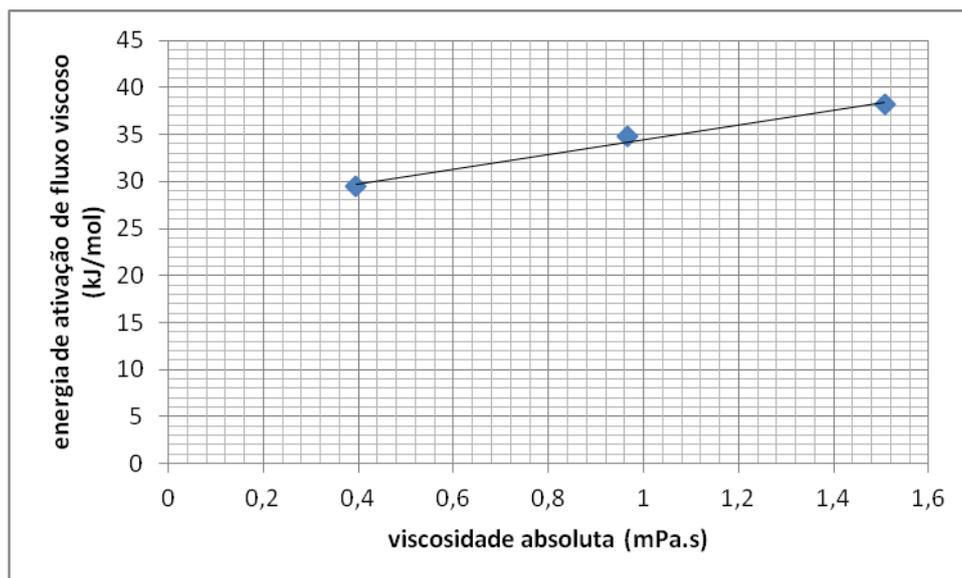


Figura 3 – Correlação entre a viscosidade absoluta e a energia de ativação de fluxo viscoso para os óleos lubrificantes SAE 10, SAE 30 e SAE 40.

Pode-se observar na Figura 3 que existe uma correlação entre a viscosidade absoluta e a energia de ativação de fluxo viscoso para os óleos lubrificantes SAE 10, SAE 30 e SAE 40. De maneira que, quanto maior a viscosidade absoluta, maior a energia de ativação de fluxo viscoso. Esses resultados são corroborados pela Teoria Estado Ativado de Eyring (SILVA; PAREDES; REIS, 2007; RIBEIRO *et al.*, 2005).

4. CONCLUSÕES

O objetivo desse trabalho foi estimar a energia de ativação de fluxo viscoso do óleo lubrificante SAE 10, a partir das Equações de Vogel e Arrhenius.

Em um intervalo de temperatura entre 10 e 150°C, a energia de ativação de fluxo viscoso para o óleo lubrificante estudado equivale a 29,4966 kJ.mol⁻¹. Esse valor, em comparação a outros óleos lubrificantes encontrados na literatura, é o de menor valor. Dessa forma, sugere-se que existe menor variação na viscosidade absoluta em função da temperatura e vice-versa para o óleo lubrificante SAE 10 em relação aos demais óleos lubrificantes.

O óleo lubrificante SAE 10, por apresentar uma menor energia de ativação de fluxo viscoso em relação aos outros óleos lubrificantes, necessita de uma menor quantidade de energia para se escoar.

Entre os óleos lubrificantes SAE 10, SAE 30 e SAE 40 existe uma correlação entre a viscosidade absoluta (a 38°C) e a energia de ativação de fluxo viscoso. De maneira que, quanto maior a viscosidade absoluta, maior a energia de ativação de fluxo viscoso.

REFERÊNCIAS

BRINGEL, R.M.; SOARES, S.A.; SOARES, J.B. *Análise de susceptibilidade térmica de ligantes asfálticos através da energia de ativação de fluxo*. *Transportes*, v.17, n.1, p.46-52, 2009.

BRUNETTI, F. *Mecânica dos Fluidos*. Pearson Education, São Paulo. 2008, 431p.

CANCIAM, C.A. *Efeito da temperatura na viscosidade de soluções de sacarose.* In: SANTOS JÚNIOR, G.; ALMEIDA, D.M.; MICHALOSKI, A.O. (Eds.). Série em Ciência e Tecnologia de Alimentos: agroindústria, energia e meio ambiente. Ponta Grossa: UTFPR, 2008.

CANCIAM, C.A. *Estimativa da energia de ativação de fluxo dos óleos lubrificantes SAE 20W30, SAE 20W40 e SAE 20W50.* Revista CIATEC – UPF, v.4, n.2, p.42-50, 2012a.

CANCIAM, C.A. *Estimativa da energia de ativação de fluxo dos óleos lubrificantes SAE 30, SAE 40 e SAE 50.* Revista da Universidade Vale do Rio Verde, v.10, n.2, p.202-210, 2012b.

COSTA, T.L. *Características físicas e físico-químicas do óleo de duas cultivares de mamona.* Campina Grande: UFCG, 2006. 113p. Dissertação (Mestrado em Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas) – UFCG, 2006.

DEPARTAMENTO DE FÍSICA – ICE/UFJF. Disponível em <http://www.fisica.ufjf.br/disciplinas/labfis2/pratica03.pdf>. Acesso em 14/10/2013.

FLAUZINO, R.D. *Influência da temperatura e do teor de gordura nos parâmetros reológicos do leite condensado e creme de leite.* São José do Rio Preto: Unesp, 2007. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Unesp, 2007.

GIAP, S.G.E. *The hidden property of Arrhenius-type relationship: viscosity as a function of temperature.* Journal of Physical Science, v.21, n.1, p.29-39, 2010.

GRANJEIRO, A.A.; QUEIROZ, A.J.M.; FIGUEIRÊDO, R.M.F.; MATA, M.E.R.M.C. *Viscosidades de polpas concentradas de figo-da-Índia.* Revista Brasileira de Agrociência, v.13, n.2, p.219-224, 2007.

GRATÃO, A.C.A.; BERTO, M.I.; SILVEIRA JÚNIOR, V. *Reologia do açúcar líquido invertido: influência da temperatura na viscosidade.* Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.24, n.4, p.652-656, 2004.

ÍNDIO DO BRASIL, N. *Introdução à Engenharia Química.* Ed. Interciência, Rio de Janeiro. 2004, 369p.

LIRA, S.A. *Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicação.* Curitiba: UFPR, 2004. 196p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – UFPR, 2004.

OLIVEIRA, R.C.; BARROS, S.T.D.; ROSSI, R.M. *Aplicação da metodologia Bayesiana para o estudo reológico da polpa de uva.* Revista Brasileira de produtos Agroindustriais, v.11, n.1, p.73-80, 2009.

PEREIRA, E.A.; QUEIROZ, A.J.M.; FIGUEIRÊDO, R.M.F. *Comportamento reológico de mel da abelha urucu (Melipona scutellaris, L.).* Revista Ciências Exatas e Naturais, v.5, n.2, p.179-186, 2003.

PINHEIRO, J.I.D.; CUNHA, S.B.; CARVAJAL, S.R.; GOMES, G.C. *Estatística básica: a arte de trabalhar com dados.* Ed. Elsevier, Rio de Janeiro. 2009, 295p.

PROFITO, F.J. *Modelagem unidimensional do regime misto de lubrificação aplicado a superfícies texturizadas.* São Paulo: USP, 2010. 193p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – USP, 2010.

RIBEIRO, L.D.; DA CRUZ, S.R.A.; REIS, R.; TAVARES, F.W. *Cálculo de viscosidade de misturas não eletrolíticas.* In: VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Campinas, 2005. Disponível em <http://www.feq.unicamp.br/~cobeqic/ttd07.pdf>. Acesso em 13/10/2013.

SILVA, A.A.; PAREDES, M.L.L.; REIS, R.A. *Modelagem de viscosidade de misturas não eletrolíticas*. In: VII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, São Carlos, 2007. Disponível em http://www.ufscar.br/cobeqic07/pdf/poster_ii/pii24.pdf. Acesso em 13/10/2013.

SILVA, S.A. *Estudo do comportamento reológico dos adesivos hot melt PSA e a sua relação com a composição e as propriedades adesivas*. Porto Alegre: UFRGS, 2008. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UFRGS, 2008.

TRIOLA, M.F. *Introdução à Estatística*. LTC, Rio de Janeiro. 2008, 720p.