



PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM VISCOSÍMETRO / REÔMETRO COMPUTADORIZADO

Samuel E. de Lucena

Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Elétrica
av. Ariberto Cunha, 333, Guaratinguetá, SP, Brasil, 12500-000

Luiz Carlos Sandoval Góes

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Mecânica
CTA, São José dos Campos, SP, Brasil, 12228-900

***Resumo.** A partir de uma célula de medição de viscosidade do tipo Couette, equipada com sensor de torque, através de molas helicoidais e de um potenciômetro, ambos retirados de um reômetro comercial obsoleto, projetou-se e construiu-se um viscosímetro / reômetro computadorizado capaz de medir automaticamente a viscosidade dinâmica (aparente) e obter o reograma de fluidos newtonianos e não-newtonianos. Um microcomputador controla a taxa de cisalhamento (de 50 a 500 s^{-1}) (ou 10 a 100 rpm) imposta ao fluido e, a partir da leitura do sinal de torque, calcula a tensão de cisalhamento (de 2,7 a 70 Pa) e a viscosidade (de 5 a 1400 mPa.s). Os resultados de medições com óleo lubrificante demonstram o uso vantajoso de um motor de passo para acionamento do cilindro giratório.*

***Palavras-chave:** : Viscosímetro, Reômetro, Reometria, Viscosidade, Reologia*

1. INTRODUÇÃO

Mede-se a consistência de um meio líquido pela viscosidade, a qual caracteriza sua resistência ao escoamento quando submetido a um esforço cisalhante. A velocidade na qual um material se deforma é uma função de sua composição, mantida constante a temperatura, e pode ser uma função linear, ou não, da tensão de cisalhamento. A maneira tradicional para determinação das propriedades reológicas de um fluido é submeter uma amostra deste a uma taxa de cisalhamento (ou tensão de cisalhamento) conhecida e medir-se a tensão de cisalhamento (ou taxa de cisalhamento) resultante. Isto pode ser realizado em regime de cisalhamento permanente, transitório ou dinâmico.

Os reômetros modernos têm lançado mão a avançadas tecnologias, como motores de alta aceleração, motores com torque controlado, mancal a ar, novos sensores de torque, codificadores ópticos, e aquisição de dados e controle por microcomputador (Piau *et al.*, 1994).

Hoje, os reômetros científicos abrangem desde um viscosímetro capilar de vidro, de US\$50, adequado para fluidos newtonianos, até máquinas que alcançam algumas centenas de milhares de dólares, usadas no estudo do escoamento e das propriedades viscoelásticas de soluções de polímeros (Litt, 1989).

Uma parte considerável tanto dos reômetros comerciais como dos instrumentos encontrados na literatura especializada usa as chamadas geometrias reológicas – a dos cilindros concêntricos e a do cone e plano, porque as equações que descrevem o escoamento do fluido ensaiado nestas geometrias têm solução exata, permitindo, assim, a realização de medidas precisas. Nestes instrumentos, usa-se sempre um motor de corrente contínua, com ou sem escovas, para acionar o cilindro giratório (ou o cone, no caso da geometria cone e plano). Neste caso, além do circuito e do programa para controle da velocidade do motor, torna-se indispensável o emprego de um ou mais sofisticados sensores de velocidade, juntamente com a eletrônica necessária para condicionamento do sinal (Jimenez & Kostic, 1994; Smits *et al.*, 1992; Stein & Spera, 1998; van den Brule & Kadijk, 1992). Isto torna o instrumento mais caro, com maior número de itens, montagem e manutenção mais trabalhosas e programa de controle mais complexo.

Tozaki *et al.* (1993) projetaram um viscosímetro / reômetro em que empregaram um motor de passo e um fio de torção para aplicar tensão de cisalhamento constante ao fluido. Usaram, porém, controle em malha fechada, medindo a torção e a taxa de cisalhamento com a ajuda de um codificador óptico.

Neste trabalho, usam-se um motor de passo, em vez de um motor DC, para acionar o cilindro giratório de uma célula de Couette, e um sistema de medição de torque através de molas de torção e de um potenciômetro e, desta forma, efetua-se o controle da velocidade do motor em malha aberta, sem o uso de sensores de velocidade, simplificando significativamente o projeto do instrumento.

2. DESCRIÇÃO DO INSTRUMENTO

A Figura 1 mostrar um diagrama esquemático do viscosímetro e a Fig. 2 destaca a montagem de suas partes mecânicas. No modelo de viscosímetro / reômetro em desenvolvimento, realiza-se a medição de viscosidade com taxa de cisalhamento constante, com o cilindro interno girando (princípio de Searle) com velocidades angulares constantes e controláveis. Este cilindro deforma continuamente a amostra do fluido de teste, a qual exerce então sobre ele um torque viscoso. Mede-se este torque através de uma mola helicoidal cilíndrica e de um potenciômetro. A mola tem uma extremidade acoplada ao eixo do motor de passo, através de uma transmissão, e a outra extremidade fixada no eixo do cilindro giratório. O potenciômetro tem o corpo fixado numa extremidade da mola e a haste móvel fixada na outra extremidade da mola. O torque viscoso provoca uma torção na mola, e esta torção causa uma alteração proporcional no valor da resistência do potenciômetro, o qual faz parte de um braço de uma ponte de Wheatstone. O valor de sua resistência, com a mola na posição de repouso, equilibra a ponte.

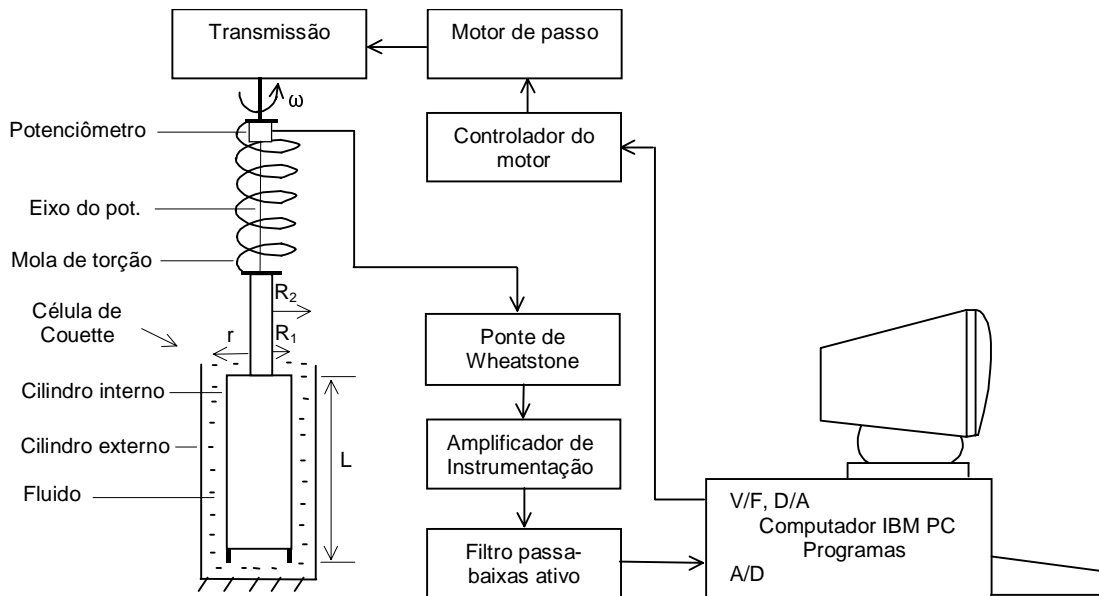


Figura 1 – Diagrama esquemático do viscosímetro / reômetro computadorizado. Os cilindros são de aço Cromo-Níquel, $R_1 = 19,6$ mm, $R_2 = 20$ mm, e $L = 71,90$ mm.

Um amplificador de instrumentação detecta o desvio sofrido pelo potenciômetro e amplifica-o, para torná-lo adequado à digitalização. Antes, porém, o sinal de torque passa por um filtro passa-baixas ativo ($f_c = 0,1$ Hz) que atenua os ruídos de alta frequência provocados pela vibração do motor de passo, além de proporcionar um ganho de 2,114 no sinal. O programa lê o sinal de torque, com a ajuda de um conversor analógico / digital (A/D) de 12 bits. Este programa também fornece um sinal quadrado, com frequência proporcional à taxa de cisalhamento desejada, ao controlador do motor de passo, fazendo-o girar com velocidade angular constante. Gera-se este sinal através de um conversor D/A de 12 bits e de um conversor tensão/frequência de precisão. O programa calcula o valor da taxa de cisalhamento, a partir da velocidade angular e das dimensões dos cilindros, e calcula a tensão de cisalhamento, usando a leitura do torque, as dimensões dos cilindros, a rigidez da mola, a sensibilidade da ponte, o ganho do circuito de condicionamento do sinal, bem como a função de transferência do A/D. Calcula-se a viscosidade da amostra, usando os valores da tensão de cisalhamento e do gradiente de velocidade.

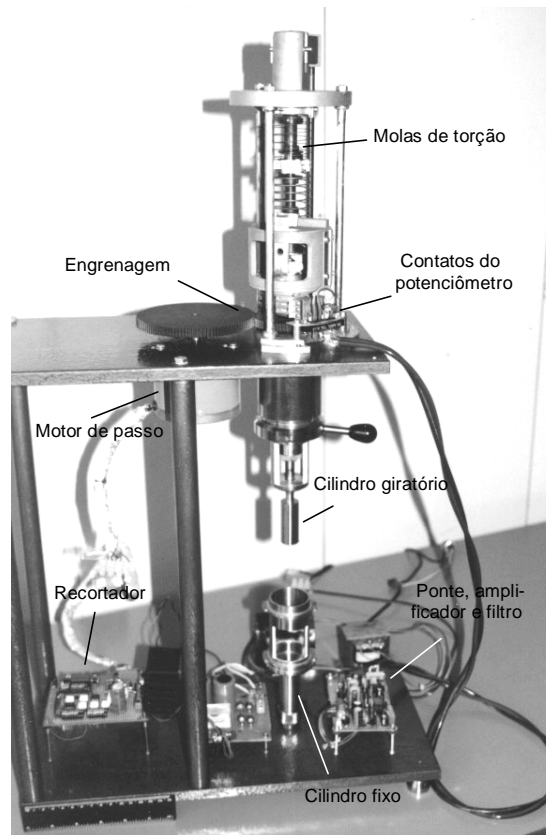


Figura 2 – Fotografia destacando várias partes mecânicas e módulos eletrônicos do viscosímetro / reômetro.

2.1 A célula de medição de viscosidade (célula de Couette) e a transmissão

A substância a ser investigada fica na fenda anular (entreferro) de um sistema de cilindros coaxiais, de raios R_1 e R_2 e comprimento L (Fig. 1). O cilindro externo estacionário forma o recipiente de medição e contém a substância ensaiada. O cilindro interno é montado no centro de um suporte metálico que projeta para baixo um guia cilíndrico, envolvendo o eixo do cilindro interno (Fig. 2). O cilindro externo é usinado em um bloco metálico, cuja parte superior também é um cilindro oco de raio maior e que veste exatamente o guia cilíndrico do cilindro interno, proporcionando, assim, a coaxialidade entre os cilindros interno e externo. As superfícies dos cilindros são todas polidas com lixa e apresentam baixa rugosidade (embora não quantificada neste trabalho).

Neste projeto, trabalha-se com taxa de cisalhamento imposta, efetuada impondo-se ao cilindro interno uma velocidade angular ω conhecida. O escoamento da substância se organiza em camadas cilíndricas coaxiais, com velocidades angulares diferentes, variando continuamente de 0 (para a camada em contato com o cilindro externo) a ω (para a camada em contato com o cilindro interno). Aparece, em todo ponto da amostra, uma velocidade de cisalhamento $\dot{\gamma}$ e uma tensão de cisalhamento τ .

Assim que estabelece-se o regime permanente, a tensão de cisalhamento na camada em contato com o cilindro giratório é dada por (Schiozer, 1982):

$$\tau = \frac{T}{2\pi \cdot R_1^2 \cdot L} \quad (1)$$

Onde T é o torque exercido sobre o cilindro giratório. A superfície inferior deste cilindro é côncava e um enchimento cuidadoso aprisiona uma bolsa de ar entre ela e o fluido do fundo do cilindro externo. Assim, pode-se considerar que o torque, T, é produzido apenas pela camada de fluido entre os dois cilindros (despreza-se o conjugado produzido pelo ar sobre a superfície inferior).

A distribuição da velocidade de cisalhamento na fenda anular é:

$$\dot{\gamma}(r) = r \frac{d\omega}{dr} \quad (2)$$

Para determinação do comportamento reológico do material, seria então necessário se conhecer antecipadamente a lei de distribuição da velocidade angular $\omega(r)$, a qual é função de suas propriedades reológicas. No entanto, é possível contornar-se esta dificuldade utilizando-se um entreferro estreito.

Pode-se admitir, para esta condição e em primeira aproximação, que a taxa de cisalhamento, $\dot{\gamma}$, é constante no entreferro e é dada por:

$$\dot{\gamma} = \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \cdot \omega \quad (3)$$

Qualquer que seja o comportamento reológico do material estudado, sua velocidade de cisalhamento, $\dot{\gamma}$, depende apenas de τ . É possível, portanto, sem se fazer nenhuma hipótese acerca das propriedades reológicas da substância, determinar-se $\dot{\gamma}$. Variando-se a velocidade de cisalhamento e medindo-se a tensão de cisalhamento, pode-se determinar vários pontos (τ , $\dot{\gamma}$) e construir-se o reograma da substância.

O eixo do motor de passo está acoplado ao eixo do cilindro giratório por uma engrenagem. A relação entre a velocidade angular do motor e a velocidade angular do cilindro, determinada experimentalmente, é:

$$\omega_{cilindro} [rd / s] = \omega_{motor} [rd / s] \cdot 1,5831 \quad (4)$$

2.2 O sensor de torque e o circuito de condicionamento do sinal de torque

As molas helicoidais. Duas molas helicoidais cilíndricas (uma 10 vezes mais rígida do que a outra) e um mecanismo que permite acoplar ou a mola de menor rigidez ou ambas, em série, forma o sistema para detecção do torque viscoso. O cilindro giratório fica unido pelo eixo de medição à combinação das molas helicoidais cujo desvio constitui uma medida do momento de torção, T, que atua sobre o cilindro interno (Figs. 1 e 2). As torções sofridas pelas molas são relativamente pequenas, a fim de que estas trabalhem na região linear.

O potenciômetro. O desvio da mola explora-se por um potenciômetro, o qual forma parte de um dos braços de uma ponte de Wheatstone. Sheingold (1981) demonstra que alimentando-se a ponte com 10 V e para um desvio máximo de 0,2% em torno da posição de equilíbrio, a saída da ponte será linear, dentro de 0,1 %, excursionando entre 0 e 5 mV. Neste caso, a sensibilidade da ponte será de $500 \cdot V/V$.

Experimentalmente, determinou-se que o sinal de saída da ponte, com as molas em série, é dado por:

$$V_{ponte} [mV] = 0,39629 \cdot T [mN \cdot m]. \quad (5)$$

O circuito de condicionamento do sinal de torque. Este circuito amplifica o pequeno sinal diferencial de saída da ponte, o qual excursiona sobre uma tensão contínua de 5 V, fazendo-o ocupar toda a faixa útil (0 a 2,5 V) do conversor analógico/digital da placa de aquisição de dados. Além disto, utiliza-se um filtro passa-baixas ativo, tipo Tchebyshev, 2ª ordem, com frequência de corte em 0,1 Hz, com o objetivo de atenuar o ruído provocado principalmente pelas vibrações do motor de passo em baixa rotação.

A tensão na saída deste circuito é dada por:

$$V_{amp} = V_{ponte} \cdot Ganho_{amp} \cdot Ganho_{filtro}. \quad (6)$$

O Ganho do filtro ativo é de 2,114, enquanto o Ganho do amplificador diferencial foi ajustado experimentalmente em 243,61 para que V_{amp} ocupasse toda a faixa dinâmica do A/D.

2.3 Circuito para acionamento do motor de passo

Projetou-se um circuito recortador (*chopper*) (2A / fase, $46 V_{m\acute{a}x}$) para controle e acionamento de um motor de passo bipolar. Este circuito permite superar o enorme empecilho causado pela queda abrupta do torque de saída do motor de passo com o aumento da velocidade de rotação (nos modos passo integral e meio-passo). Para tanto, aplica-se uma tensão de alimentação nas bobinas do motor várias vezes maior (8 vezes, neste projeto) do que a tensão nominal e, a fim de que o motor não seja destruído por superaquecimento, limita-se a corrente em cada enrolamento do motor por meio de sensores de corrente e de um circuito de controle que corta a alimentação cada vez que o limite superior de corrente for atingido, voltando a religá-la em seguida, numa frequência pré-estabelecida (20 kHz, neste projeto). Desta maneira, estende-se a curva de torque \times velocidade do motor muito além dos limites propiciados por um acionador comum, e permite-se a medição de viscosidade em taxas de cisalhamento maiores.

2.4 Placa para aquisição do sinal de torque e controle do recortador

Esta placa, para IBM PC com barramento padrão ISA, contém um conversor A/D de um canal (entrada dinâmica de $\pm 2,5$ V, frequência máxima de 150 kHz), um conversor D/A de um canal (saída na faixa ± 10 V, frequência máxima de 1 MHz), ambos de 12 bits e trabalhando com o código binário deslocado, 8 entradas digitais e 8 saídas digitais. A placa contém também um conversor tensão / frequência, de precisão, controlado pelo conversor

D/A. A frequência do sinal de saída do conversor V/F, conectado ao circuito controlador do motor de passo, determina a velocidade de rotação do motor ($0,9^\circ$ / passo). Com estes circuitos, pôde-se realizar com relativa facilidade rampas de aceleração e desaceleração, fundamentais para o bom funcionamento do motor de passo. Experimentalmente, determinou-se que a relação entre o dado de 12 bits (um número entre 2048 e 4096) fornecido ao D/A e a frequência do sinal gerado pelo V/F é dada por:

$$F_{V/F} [Hz] = -8009,74 + 3,92 \cdot Dado_{D/A} \quad (7)$$

Com o motor operando no modo meio-passo, a relação entre a velocidade angular do motor e a frequência do sinal de saída do conversor V/F é dada por:

$$\omega_{motor} [rd / s] = \frac{\pi}{200} \cdot F_{V/F} [Hz] \quad (8)$$

A função de transferência do conversor A/D é:

$$Dado_{A/D} = \frac{V_{amp} + 2,5}{2,5} \cdot 2048 \quad (9)$$

A base de tempo para a taxa de amostragem do sinal de torque obteve-se ligando um circuito oscilador (5 kHz), realizado com LM555, a uma das entradas digitais e consultando, no programa, esta entrada. Sem dúvida, teria sido mais fácil (e será uma melhoria a fazer-se no futuro) incluir circuitos temporizadores programáveis na placa projetada.

2.5 Programa para acionamento do motor de passo e aquisição de dados

Um programa, em linguagem C, realiza todo o controle do experimento, o qual pode ser de dois tipos básicos: a) medição da viscosidade em uma taxa de cisalhamento escolhida; b) levantamento do reograma (curva tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento), para uma gama de taxas de cisalhamento escolhida. Em ambos os casos, o programa deve fazer o motor acelerar até a taxa de deformação em que realizará a medição, esperar que o sinal de torque se estabilize e, finalmente, realizar a leitura do torque, calcular a viscosidade aparente e salvar o(s) resultado(s) em arquivo. Em caso de sobretorque, por qualquer que seja o motivo, o programa interrompe o experimento, a fim de proteger o operador e o aparato.

Tratamento e visualização dos dados. Com objetivo de realizar-se uma filtragem extra no sinal de torque digitalizado, após sua estabilização, tira-se a média de 30 leituras deste sinal, para uma dada taxa de cisalhamento. Visto que os valores de torque e taxa de cisalhamento são gravados em arquivo, qualquer outro processamento pode ser realizado, seja no programa desenvolvido, seja utilizando-se pacotes comerciais para processamento matemático e visualização de dados. Devido ao baixo custo relativo e alta qualidade dos programas comerciais, optou-se por usar um deles para visualização das curvas originadas neste projeto.

3. RESULTADOS

Em todas os experimentos, manteve-se constante a temperatura da célula de medição, pelo uso de um termostato de fluido circulante (água), em que a célula de medição fica inserida, capaz de regular a temperatura com desvio máximo de +/- 0,01 Kelvin. Desta forma, elimina-se a influência que a temperatura exerce sobre a viscosidade, inclusive o aumento devido ao próprio cisalhamento, além de permitir medições em diferentes temperaturas.

Até o presente, avaliou-se o desempenho do viscosímetro, medindo-se a viscosidade de um fluido newtoniano em diferentes velocidades de deformação, tanto com o protótipo como com um viscosímetro comercial (Tabela 1). Usou-se, para tanto, 25 ml de óleo SAE 30, e mediu-se sua viscosidade, à temperatura ambiente de 24° C, para a faixa de taxas de cisalhamento de 50 a 350 s⁻¹ (10 a 68 rpm, respectivamente).

Tabela 1. Medidas da viscosidade do óleo SAE 30 realizadas pelo protótipo e por um viscosímetro comercial, em diferentes gradientes de cisalhamento.

Taxa de cisalhamento (1/s)	Viscosidade medida pelo protótipo @ 24° C (mPa.s)	Viscosidade medida pelo viscosímetro Brookfiel DV-II @ 24° C (mPa.s)	Diferença (tomando o valor do Brookfield como referência) (%)
50	294	284*	3,5
100	257	-	-
150	259	269	3,7
200	246	-	-
250	254	-	-
300	250	261	4,2
350	252	-	-

* - Medição realizada na faixa menos confiável do instrumento (torque muito baixo).

Observa-se uma variação máxima de 4,5% no valor da viscosidade, para o trecho entre 100 e 350 s⁻¹ (19,5 a 68,2 rpm, respectivamente). Este resultado, observado também com óleos newtonianos com outros graus de viscosidade, é coerente com o que se poderia esperar de um fluido newtoniano, ou seja, que a viscosidade fosse independente da taxa de cisalhamento. Esta pequena variação mostra que é possível medir-se a viscosidade de líquidos, usando-se um motor de passo para acionar o cilindro móvel. Este resultado é melhor observado no gráfico da Fig. 3., onde nota-se que, a partir da taxa de cisalhamento 100 s⁻¹ (19,5 rpm), a valor da viscosidade é praticamente constante. O desvio observado na medição realizada no gradiente de cisalhamento 50 s⁻¹ é provocado pela vibração mecânica do motor de passo, que excita a estrutura mecânica e alcança o sensor torque, causando erro na leitura do torque. A vibração mecânica do motor de passo diminui acentuadamente, à medida que se aumenta sua velocidade de giro e, portanto, deixa de interferir no sensor de torque.

Nota-se uma diferença de, no máximo, 4,2% entre a viscosidade medida pelo protótipo e a viscosidade medida pelo viscosímetro da Brookfield Ltd, a partir da taxa de cisalhamento 100 s⁻¹ (19,5 rpm). Esta diferença está dentro do limite esperado para o protótipo e deve-

rá ser reduzida ainda mais, já que o mesmo receberá melhorias tanto nos circuitos quanto na montagem.

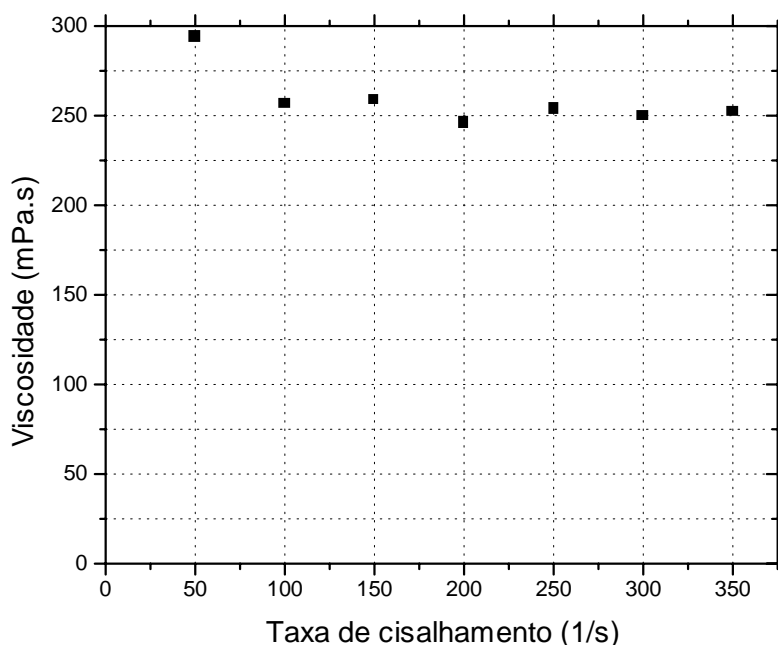


Figura 3 – Viscosidade do óleo SAE 30, à temperatura ambiente de 24• C, medida pelo instrumento deste projeto em diferentes taxas de cisalhamento.

4. CONCLUSÃO

O que se obteve de resultado até o presente demonstra que é possível tirar proveito das características positivas do motor de passo (fácil interface com o computador e possibilidade de controle em malha aberta) e usá-lo como fonte de torque em projetos de viscosímetros e reômetros, tornando-os mais simples. É indispensável, para tanto, que o motor seja acionado através de um circuito recortador e que o circuito de condicionamento do sinal de torque inclua um filtro passa-baixas com frequência de corte muito inferior àquela de acionamento do motor. Tendo em vista a importância deste tipo de instrumento em aplicações industriais e acadêmicas e o elevado preço dos modelos comerciais, os avanços realizados dão coragem para, numa próxima etapa, projetar-se também uma célula para medição de viscosidade e, assim, ter-se domínio completo sobre o projeto do instrumento.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Energia da UNESP de Guaratinguetá, pelo empréstimo do Reômetro Rheotest 2.1 da VEB MLW Prüfgeräte-Werke Medingen, ao Sr. Rodolfo dos Santos, pela construção do suporte mecânico, ao Prof. Dr. Inácio Bianchi, pelas sugestões e ajuda nas calibrações, à Prof^a. Dr^a. Mirabel C. Rezende, da Divisão de Materiais Raros/IAE/CTA, pelas medições com o viscosímetro Brookfield, à CAPES /PICDT, pela bolsa de estudos, e, pela ajuda na divulgação, à FUNDUNESP.

REFERÊNCIAS

- Jimenez, J. A. & Kostic, M., 1994, A novel computerized viscometer / rheometer, Review of Scientific Instruments, vol. 65, n. 1, pp. 229-241.
- Litt, M., 1989, Rheology – past, present and future, Chemical Engineering Progress, vol. 85, n. 12, pp. 54-60.
- Piau, J. M., Bremond, M., Couette, J. M., and Piau, M., 1994, Maurice Couette, one of the founders of rheology, Rheologica Acta, vol. 33, n. 5, pp. 357-368.
- Schiozer, D., 1982, Mecânica dos Fluidos, 2ª edição, LTC, São Paulo.
- Sheingold, D. H., 1981, Transducer Interfacing Handbook, Analog Devices Inc., Massachusetts.
- Smits, H. J. E., van den Ende, D., Beukema, G. J., Altena, E. G., and Spitteler, P. H. J., 1992, An automated dynamic viscometer with air bearing and inductive transducers for angular displacement detection, Rheologica Acta, vol. 31, n. 5, pp. 471-480.
- Stein, D. J. & Spera, F. J., 1998, New high-temperature rotational rheometer for silicate melts, magmatic suspensions, and emulsions, Review of Scientific Instruments, vol. 69, n. 9, pp. 3398-3402.
- Tozaki, K-I., Miyatani, T., and Itou, S., 1993, Instrument for measuring viscosity and shear modulus under steady shear stress, Japanese Journal of Applied Physics, Part I: Regular Papers & Short Notes & Review Papers, vol. 32, n. 6A, pp. 2892-2894.
- Van den Brule, B. H. A. A. & Kadijk, 1992, A simple constant-stress rheometer, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, vol. 43, pp. 127-139.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A COMPUTERIZED VISCOMETER / RHEOMETER

Summary. A computerized viscometer / rheometer was designed based on a Couette cell and a helical spring torque meter, both taken from an obsolete commercial rheometer. The applicable shear rate is from 50 to 500 s⁻¹, the measurable range of shear stress is from 2.7 to 70 mPa, and calculated range of viscosity is from 5 to 1400 mPa.s. The use of a stepping motor to drive the rotating bob simplifies both the electronics and the control program. Preliminary results with lubricant oils have shown good agreement with literature data.

Keywords: Viscometer, Rheometer, Viscosity, Rheology, Rheometry