

Uso do Viscosímetro Brookfield em Determinações Reológicas

Carlos Alberto da Silveira

Resumo - O viscosímetro Brookfield, frequentemente disponível em laboratórios de controle de qualidade, pode ser usado com vantagens na caracterização reológica de fluidos Newtonianos e não-Newtonianos. A atual disponibilidade de sistemas de medida operacionais amplia ainda mais sua faixa de utilização. É necessário, contudo, o uso de métodos de cálculo que transformam os resultados fornecidos diretamente pelo aparelho em grandezas reológicas adequadas.

INTRODUÇÃO

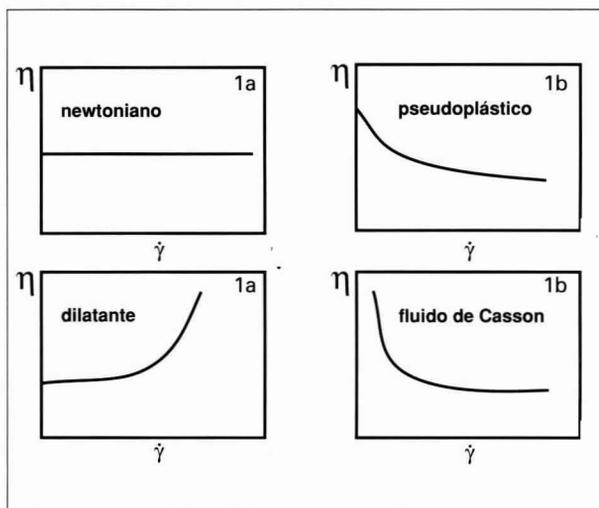
O viscosímetro Brookfield é, sem dúvida, um dos instrumentos mais utilizados mundialmente na medida de viscosidade. Devido a seu custo, modesto em relação a outros viscosímetros de velocidade variável, encontra grande aplicação nos laboratórios de controle de qualidade das indústrias químicas, alimentícias e de cosméticos, entre outras.

Apesar de sua relativa simplicidade, este aparelho pode realizar estudos reológicos bastante avançados. Graças à aplicação de técnicas de cálculo relativamente recentes [1,2,3], é possível a determinação dos gradientes de velocidade correspondentes a uma série de valores de rotação N (rpm) e construir-se assim a curva viscosidade (η) em função de $\dot{\gamma}$ necessária à caracterização reológica de um fluido. Neste tipo de gráfico, um fluido Newtoniano apresentar-se-á como uma reta paralela ao eixo das abcissas (fig. 1a), enquanto que um fluido não-Newtoniano obedecerá a um outro tipo de curva (fig. 1b, 1c e 1d).

O viscosímetro Brookfield, além de seu custo relativamente reduzido, oferece ainda uma série de vantagens, como por exemplo:

- Alta sensibilidade da mola sensora de torque (sobretudo nos modelos LVT e RVT);
- Disponibilidade de sistemas concêntricos opcionais, além dos sistemas de disco "standard" fornecidos junto com o aparelho;
- Os novos modelos digitais permitem o registro gráfico de medidas e sua apresentação direta, o que elimina o uso de tabelas e cálculos de conversão.

De forma geral, o problema das determinações reológicas utilizando o viscosímetro Brookfield consiste em uma série de técnicas que permitem:



- a) variar a velocidade de rotação N de um sistema sensor,
- b) determinar o gradiente de velocidade $\dot{\gamma} = dv/dy$ correspondente a esta rotação.
- c) calcular a viscosidade correspondente.

As técnicas descritas a seguir serão divididas, para maior facilidade de compreensão, em três categorias:

- a) Estado Estacionário ("steady-state") com sensores de disco (também chamados de "standard");
- b) Estado Estacionário com sensores tipo cilindros concêntricos;
- c) Relaxação de mola (com sensores de disco, somente).

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

- 1: Estado Estacionário com sensores "standard" de disco: São os sensores que acompanham todo viscosímetro

Brookfield. Teoricamente podem ser considerados como um disco girando em torno de seu centro, imerso em um fluido infinito (isto é, o recipiente que o contém deve ser suficientemente grande para que suas paredes não interfiram na medida). Nestas condições, verifica-se [1] que o gradiente de velocidade corrigido para escoamento não-Newtoniano é dado por:

$$\dot{\gamma} = 4 \cdot \pi \cdot N / (60 \cdot K) \quad (1)$$

onde K = fator de correção de gradiente de velocidade, dado por:

$$K = d \ln \tau / d \ln \dot{\gamma} = d \ln S / d \ln N \quad (2)$$

em que τ = tensão de cisalhamento, MPa (ou dinas/cm²)

S = leitura na escala do aparelho

Se o fluido em questão é Newtoniano, K = 1.

Caso disponhamos de valores de viscosidade aparente (isto é, aquela fornecida diretamente pelo aparelho) e tabelados em função da rotação N, K pode ser calculado por:

$$K = [1 + d \ln \eta_a / d \ln N]^{-1} \quad (3)$$

Uma aproximação satisfatória de K é dada por:

$$K = [1 + (\ln \eta_{a_{i+1}} - \ln \eta_{a_i}) / (\ln N_{i+1} - \ln N_i)]^{-1} \quad (4)$$

onde (N_i, η_i) e (N_{i+1}, η_{i+1}) são dois pontos experimentais consecutivos, obtidos fazendo-se variar N conforme as velocidades disponíveis no aparelho (0,5 - 1,0 - 2,5 - 5 - 10 - 20 - 50 - 100 rpm, para o modelo RVT) e registrando-se as viscosidades aparentes η_a indicadas pelo aparelho. Como K é calculado para cada intervalo [N_i, N_{i+1}], admite-se que o último $\dot{\gamma}$ será corrigido com o K calculado no intervalo anterior.

As viscosidades corrigidas η serão obtidas a partir dos η_a por:

$$\eta = \eta_a / k \quad (5)$$

Os valores corrigidos η e $\dot{\gamma}$ são levados a um gráfico log-log, que servirá para a caracterização reológica do fluido em estudo.

Além do método acima exposto, descrito por Pierce (1), é também empregado o método de Mitschka (2), que apesar de utilizar uma técnica matemática diferente, conduz a resultados próximos.

2: Estado Estacionário com Sensores Cilindros Concêntricos:

Apesar de o sistema de cilindros concêntricos para medidas de viscosidade poder ser descrito de forma bastante aprofundada [3,4], podemos dizer, de forma simplificada, que a viscosidade e o gradiente de velocidade são determinados em tal sistema através das equações:

$$\dot{\gamma}_a = M \cdot N \quad (6)$$

$$\tau = A \cdot S \quad (7)$$

$$e \eta_a = \tau / \dot{\gamma}_a \quad (8)$$

onde M e A são constantes do aparelho, S é o valor lido na escala (geralmente em porcentagem do torque máximo mensurável no aparelho) e τ é a tensão do cisalhamento (em MPa ou dinas/cm²). A equação 8 nada mais é do que a equação de Newton da viscosidade.

O cálculo do gradiente de velocidade $\dot{\gamma}_a$ a partir da

constante M do aparelho é válido somente para fluidos newtonianos. Como no sistema cilíndrico $\dot{\gamma}$ varia dentro do espaço anular entre os cilindros em função da distância ao eixo do sensor, a viscosidade de um fluido não-Newtoniano também irá variar de acordo com esta distância. Neste caso, é necessário introduzir uma correção que possibilite o cálculo de $\dot{\gamma}$ na superfície do cilindro interno.

Esta correção é aplicada da seguinte forma:

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_a / k' \quad (9)$$

$$e K' = (1 - s^2) / [n \cdot (1 - s^2)] \quad (10)$$

$$\text{em que } s = R_i / R_e \quad (11)$$

$$e n = d \ln \dot{\gamma} / d \ln \tau = d \ln N / d \ln S \quad (12)$$

Se o fluido obedece à chamada "Lei das Potências"

$$\dot{\gamma} = k \tau^n \quad (13)$$

e n é uma constante, passível de ser calculada através de regressão linear logarítmica dos dados de S e N. Se o fluido em estudo for Newtoniano, n=1 e K'=1.

Finalmente, tendo-se o fator de correção K' pode-se calcular a viscosidade corrigida η combinando-se as equações 7 e 8:

$$\eta = A \cdot S / \dot{\gamma} \quad (14)$$

Novamente, o gráfico $\log \eta \cdot \log \dot{\gamma}$ para vários valores de N servirá para caracterizar o comportamento reológico de fluidos.

3: Relaxação de Mola com Sensores de Disco:

Esta técnica, descrita inicialmente por Patton [5] em 1966 e adaptada por Smith [6] em 1982, permite a extensão da faixa de gradientes de velocidade explorável pelo viscosímetro Brookfield até valores muito baixos (tipicamente da ordem de 0,01 s⁻¹). Esta faixa de valores interessa aos fabricantes de revestimentos, pois está relacionada com importantes características reológicas de tintas (nivelamento, escorrimento e sedimentação). Este método baseia-se na variação contínua da velocidade de rotação do sensor provocada pela tensão da mola medidora de torque do aparelho, com o motor desligado. Em termos práticos, o operador gira manualmente o sensor até a posição, de máximo torque (100% na escala) e solta-o, ao mesmo tempo que aciona um cronômetro (nos modelos digitais, que são providos de saída analógica para registrador gráfico x-t, é dispensada a medida de tempo). Enquanto a leitura S da escala vai se deslocando com o tempo, a velocidade de rotação N (proporcional a dS/dt) também vai diminuindo gradualmente, tendendo a zero. Desta forma, consegue-se obter velocidades de rotação baixíssimas, que convertidas a gradientes de velocidade dão valores na faixa de 0,01 a 0,2 s⁻¹ (para os sistemas de disco). Existe, contudo, a necessidade de considerar a inércia dos sensores, que poderá causar um erro (sobretudo no início da curva de relaxação).

No caso dos sistemas de disco, também deve-se calcular o fator de correção K para cada ponto tomado na curva de relaxação. Contudo, devido à relativa complexidade dos cálculos envolvidos, estes não serão descritos no presente trabalho.

Esta técnica também é aplicável aos sistemas de cilindros concêntricos. É necessário, contudo, dispor-se de um sistema adequado para medir precisamente baixas tensões de cisalhamento, como por exemplo o Adaptador UL da Brookfield.

EXEMPLOS DE MEDIDAS REALIZADAS

As técnicas descritas neste trabalho foram aplicadas a diversos fluidos Newtonianos e não-Newtonianos, fixando-se a temperatura a 25°C. Os cálculos necessários foram efetuados em microcomputador, através de programas escritos em BASIC. Apresentamos a seguir duas curvas que demonstram a utilidade destes métodos na caracterização reológica de fluidos:

a) Óleo de silicone (padrão Brookfield para aferição de viscosímetros, com viscosidade indicada no rótulo 11950 cP). Este é um fluido tipicamente Newtoniano, no qual a viscosidade não deve apresentar variação com o gradiente de velocidade

b) Tinta látex, previamente diluída com 15% de seu peso em água e agitada por 1 minuto a 750 rpm com agitador tipo disco Cowles. Este tratamento teve por objetivo simular as condições de aplicação da tinta, a qual o pintor normalmente dilui previamente e cisalha através do pincel ou rolo.

Os resultados obtidos nos dois casos são descritos respectivamente nas figuras 2 e 3. Devemos observar que:

1) Todas as medidas, apesar de realizadas empregando diferentes métodos, produziram resultados bastante coerentes; as curvas obtidas são praticamente contínuas, com uma dispersão de pontos relativamente pequeno. A parte da curva determinada por relaxação superpõe-se à parte obtida no estado estacionário, o que comprova a validade dos cálculos efetuados.

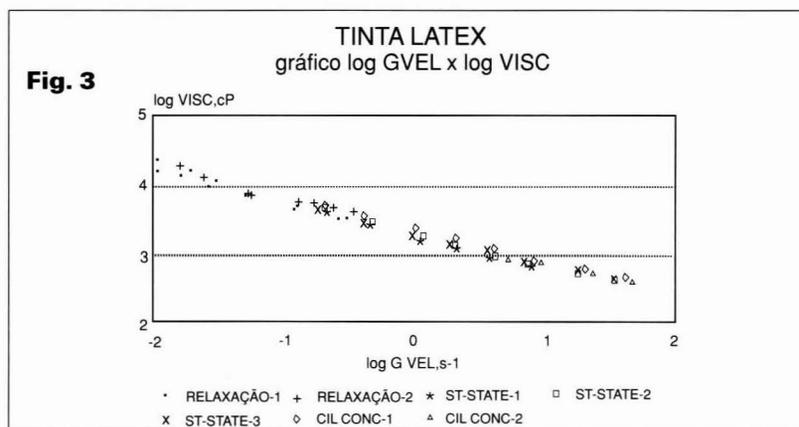
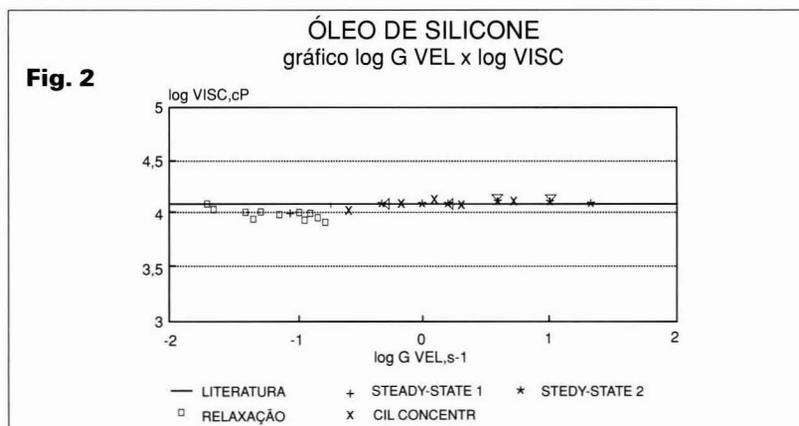
2) A viscosidade determinada para o óleo de silicone

(newtoniano) corresponde ao valor constante do rótulo do produto. Deve-se ressaltar que, apesar de conhecer-se *a priori* a natureza newtoniana deste material, o procedimento e os cálculos utilizados foram exatamente os mesmos aplicados aos fluidos não-newtonianos.

3) A tinta látex testada mostrou uma queda acentuada de viscosidade com o gradiente de velocidade, o que a caracteriza como um fluido pseudoplástico. Podemos concluir também que o tratamento prévio adotado (diluição e cisalhamento) praticamente eliminou o valor de escoamento ("Yield value") normalmente existente neste tipo de produto. Isto favorece o nivelamento após a aplicação, melhorando portanto o aspecto final da pintura.

CONCLUSÃO:

Como vimos acima, o viscosímetro Brookfield é um aparelho de custo bastante acessível, que pode ser utilizado com vantagens na caracterização reológica precisa de fluidos. Para tal, é recomendável (mas não indispensável) o uso dos sistemas cilíndricos atualmente disponíveis. Sugere-se também o emprego de programas de computador para efetuar o grande número de cálculos envolvidos nas correções necessárias.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- 1 - PIERCE, P. E., Journal of Paint Technology, 43, nº 557 (Jun 1971) p. 35
- 2 - MITSCHKA, P., Reol. Acta, 21, (1982) p. 207
- 3 - PATTON, T. C., "Paint Flow and Pigment Dispersion", 2nd ed., John Wiley (1979)
- 4 - Contraves Industrial Products Ltda., "Measurement of Rheological Properties"
- 5 - PATTON, T. C., Journal of Paint Technology, 38 (1966), nº 502, p. 656
- 6 - SMITH, R. E., JCT, 54, nº 694 (Nov. 1982) p. 21