

Reologia de suspensões minerais: uma revisão

Eliomar Evaristo Ferreira

*Engenheiro Metalurgista, Mestre, Dr., Fosfertil S/A
Caixa Postal 593 - Araxá - MG - Brasil - CEP 38183-971
E-mail: eliomarferreira@fosfertil-ultrafertil.com.br*

Paulo Roberto Gomes Brandão

*Engenheiro de Minas, Ph.D., Professor Emérito - Departamento de Eng. de Minas
UFMG - Rua Espírito Santo, 35, s. 702 - Belo Horizonte - MG - Brasil - CEP 30160-030
E-mail: pbrandao@demin.ufmg.br*

Bernhard Klein

*Metallurgical Engineer, Ph.D. - Associate Professor - Department of Mining Engineering
UBC - Room 517, 6350 Stores Road, Vancouver, B.C. Canada - V6T 1Z4
E-mail: bklein@interchange.ubc.ca*

Antônio Eduardo Clark Peres

*Engenheiro Metalurgista, Ph.D., Prof. Adjunto - Departamento de Eng. Metalúrgica e de Materiais
UFMG - Rua Espírito Santo, 35, s.206 - Belo Horizonte - MG - Brasil - CEP 30160-030
E-mail: aecperes@demet.ufmg.br*

Resumo

Durante as etapas de processamento mineral, na maioria dos casos, há o envolvimento de suspensões - misturas de minério fino com uma fase líquida. Logo, as operações de processo são influenciadas pela resistência dessas suspensões em se deformar ou fluir, quando submetidas a forças de cisalhamento ou pressão, ou seja, a viscosidade da suspensão influenciará nas etapas de processamento.

Nesse trabalho, será feita uma revisão sobre reologia de suspensões e o processamento mineral. Serão abordados aspectos conceituais sobre reologia de suspensão e suas variáveis, classificação reológica dos fluidos e determinações de viscosidade através do viscosímetro rotacional de cilindro concêntrico.

Palavras-chave: reologia, viscosidade, suspensões.

Abstract

Mineral processing is often carried out on suspensions (usually a mixture of solid particles and liquid). The process is influenced by the resistance to flow resulting from a shear stress or pressure applied in the fluid (suspension). Therefore, the viscosity of suspensions will affect the mineral process.

This paper reviews the applications of rheology in mineral processing. This review focuses on conceptual aspects such as fluid classification, variable of rheology and measurements with concentric viscometer.

Keywords: *rheology, viscosity and suspensions.*

1. Introdução

O processamento mineral compreende as operações de fragmentação, classificação, concentração, separação sólido/líquido e transporte, seja do concentrado, seja do rejeito. Todas essas operações, na maioria dos casos, envolvem a realização do processamento na forma de suspensões - misturas de minério com uma fase líquida, normalmente a água. Logo, essas operações serão influenciadas pela resistência dessas suspensões em se deformar ou fluir, quando submetidas à força de cisalhamento ou pressão, ou seja, a viscosidade da suspensão influenciará nas etapas de processamento.

De acordo com Whorlow (1980) e Barnes et al. (1989), o estudo da deformação e fluxo da matéria, os quais envolvem fenômenos de elasticidade, plasticidade e viscosidade, constitui-se no principal objetivo da reologia. A reologia de suspensões, por sua vez, compreende o estudo do comportamento de fluxo de suspensões de sólidos, utilizando, principalmente, a determinação da viscosidade aparente e da tensão de escoamento ou "yield stress". Uma das formas de caracterização do comportamento reológico de suspensões consiste na realização de ensaios de medidas da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento, reportados como curvas de fluxo. Esses ensaios são realizados através de viscosímetros de tubo ou rotacionais.

Comercialmente, os viscosímetros rotacionais estão muito bem especificados para os ensaios reológicos de fluidos monofásicos e, no máximo, de suspensões coloidais e não retratam com confiabilidade as medidas em suspensões usuais. A imprecisão desses métodos é devida, principalmente, ao erro causado pela sedimentação das partículas durante o ensaio.

No caso de suspensões de minérios, o estudo do comportamento reológico foi, no passado, pouco avaliado pelos pesquisadores da área de processamento mineral, principalmente devido ao

já mencionado erro causado pela sedimentação das partículas. Mas, recentemente, diversos estudos têm sido publicados relacionando as variáveis reológicas das suspensões de minérios com a eficiência das etapas de processamento mineral, em especial na classificação e moagem.

Nesse trabalho, será feita uma revisão sobre os principais aspectos da reologia de suspensões, como variáveis que afetam o comportamento reológico destas, o viscosímetro de cilindro concêntrico e os principais erros de medição.

2. Reologia de suspensões

Isaac Newton, em 1687, definiu a viscosidade de um fluido como a resistência ao deslizamento de suas moléculas devido à fricção interna e, quanto maior o grau de fricção interna de um fluido, maior é a sua viscosidade. Em sua abordagem matemática, Newton utilizou o modelo de duas placas de áreas A , separadas por uma distância h , movimentadas através da aplicação de uma força F , como mostra a Figura 1. De acordo com esse modelo, a força requerida por unidade de área (F/A) para manter uma diferença de velocidade entre as placas (dv/dx) é diretamente proporcional ao gradiente de velocidade através do líquido. Assim, o coeficiente de proporcionalidade é igual à viscosidade (η). A força por unidade de área é conhecida como tensão de cisalhamento (σ) e o gradiente de velocidade é conhecido como taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) (Barnes et al., 1989).

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \quad (2)$$

Substituindo (F/A) por (σ) e (dv/dx) por ($\dot{\gamma}$), tem-se a equação de Newton (acima) para a viscosidade de um fluido.

3. Classificação reológica dos fluidos

3.1 Fluidos newtonianos

Esses fluidos apresentam uma relação linear entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento, como mostra a equação de Newton (equação 2), ou seja, a viscosidade mantém-se constante com a variação na taxa de cisalhamento (Figura 2). Como exemplos de fluidos newtonianos, podem-se citar os óleos e soluções de polímeros.

3.2 Fluidos não-newtonianos

Ao contrário dos fluidos newtonianos, os fluidos não-newtonianos não apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, isto é, os valores da viscosidade mudarão com a variação nos valores da taxa de cisalhamento. Esses valores de viscosidade são considerados como viscosidade aparente, podendo aumentar ou diminuir, de acordo com as características de cada fluido.

Para alguns fluidos, os valores de viscosidade diminuem com o aumento da taxa de cisalhamento; nesse caso, diz-se que o material possui comportamento pseudoplástico. Como exemplo, têm-se alguns tipos de emulsões e vários tipos de suspensões. Entre as várias causas para esse comportamento, Shaw (1975) cita, para o caso de um sistema agregado, que a diminuição da quantidade de líquido retido pelos agregados, devido à quebra desses agregados, através da agitação, provoca uma diminuição da viscosidade.

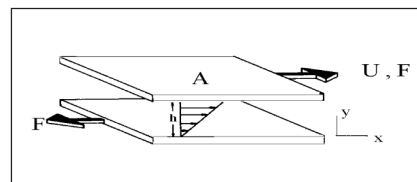


Figura 1 - Modelo de placas paralelas utilizadas por Newton para explicar a viscosidade de um líquido (Barnes, 1989).

Quando o contrário acontece, ou seja, a viscosidade aumenta com aumento da taxa de cisalhamento, diz-se que o material possui comportamento dilatante e, como exemplo, têm-se certas suspensões com alta percentagem de sólido. De acordo com Shaw (1975), esse comportamento está relacionado à quebra do empacotamento formado por essas partículas e, como o sistema possui uma alta concentração de sólido, o líquido presente não é suficiente para preencher todos os vazios.

Outros tipos de fluidos não-newtonianos são os fluidos plásticos. Esses fluidos necessitam de uma tensão finita, conhecida como tensão de escoamento ou “yield stress”, para que ocorra movimento das partículas (Figura 2). Esse tipo de comportamento é característico de suspensões pseudo-homogêneas de partículas finas ou ultrafinas. Segundo Nguyen e Boger (1983), o valor da tensão de escoamento denota a transição entre o comportamento de um sólido e um líquido. Uma das principais aplicações desse parâmetro tem sido no projeto e monitoramento do transporte de suspensões através de bombeamento, onde se deseja um valor da tensão de escoamento que possibilite o transporte de suspensões sem a ocorrência de sedimentação de partículas e, em caso de uma eventual parada do sistema, não ocorra a sedimentação imediata das partículas.

3.3. Fluidos com comportamentos reológicos dependentes do tempo

Em relação à mudança da viscosidade com o tempo, existem dois tipos de fluidos, o tixotrópico e o reopético. Os fluidos tixotrópicos apresentam uma diminuição da viscosidade com o tempo, quando submetidos a uma taxa de cisalhamento constante. Já os fluidos considerados reopéticos apresentam um aumento da viscosidade com o tempo. No processamento mineral, esse tipo de comportamento, nas suspensões, é bastante inconveniente, devido às constantes mudanças na viscosidade.

4. Variáveis que afetam a reologia de suspensões

O número de variáveis que atuam num sistema de partículas em suspensão é bastante amplo, desde as variáveis hidrodinâmicas, devido à presença do fluido, até as variáveis resultantes de fenômenos interfaciais, relacionadas à carga de superfície e à presença de reagentes químicos ou íons em solução. Todos estes fatores podem atuar simultaneamente no sistema.

Segundo Coussot (1997), as propriedades reológicas, em termos macroscópicos, serão influenciadas pelas interações, em nível microscópico, devido a transferências de energia nessas interações. Esse autor cita cinco (5) tipos de efeitos, que são: Browniano, hidrodinâmicos, de empacotamento, coloidal e efeito de inércia.

5. Viscosímetro rotacional de cilindro concêntrico

A determinação do comportamento reológico de fluidos, como polímeros e outros líquidos, é feita sem grandes dificuldades, podendo ser utilizados vários tipos de viscosímetros, como viscosímetros capilares, viscosímetro de tubo e de rotação. No entanto, a determina-

ção dos parâmetros reológicos de suspensões de minerais, na grande maioria dos casos, é realizada através do viscosímetro rotacional de cilindro concêntrico.

Os viscosímetros rotacionais de cilindro concêntrico, apesar de possuírem um custo mais elevado, são os mais utilizados na avaliação do comportamento reológico de suspensões. Esse equipamento, basicamente, consiste em dois cilindros concêntricos, onde é aplicada uma taxa de cisalhamento na suspensão e avalia-se a tensão de cisalhamento, Figura 3. O contrário também pode ocorrer. Aplica-se uma tensão de cisalhamento e avalia-se a taxa de cisalhamento provocada por esta tensão. Geralmente um cilindro gira em torno do eixo, enquanto o outro é fixo. A taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) está relacionada à variação da velocidade angular em função do raio (r), equação (7). Já a tensão de cisalhamento (σ) está relacionada ao torque (G), ou seja, à força por área necessária para provocar o cisalhamento da suspensão, equação (8).

$$\dot{\gamma} = r \frac{d\omega}{dr} \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{G}{2\pi r^2} \quad (8)$$

Whorlow (1980) descreve a solução da equação (7) para três situações:

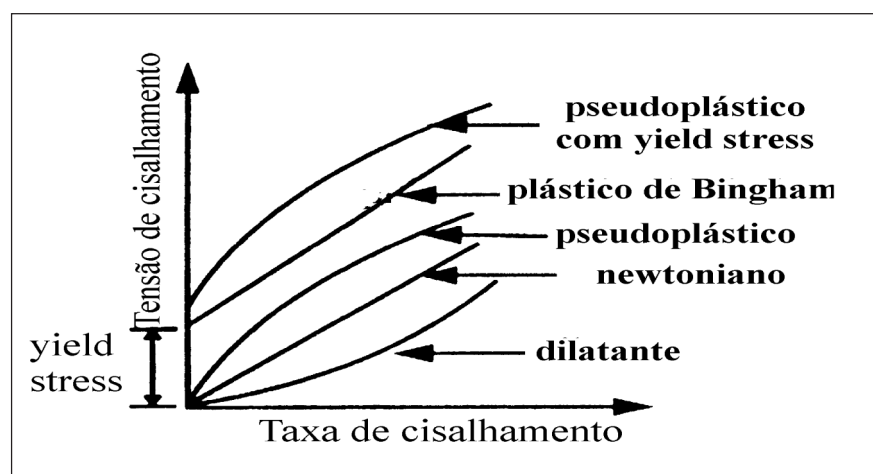


Figura 2 - Classificação do comportamento reológico de diferentes tipos de suspensões (Kawatra et al., 1996).

- Primeiro caso, quando a diferença entre o raio do cilindro interno (R_1) e o do externo (R_2), ($R_2 - R_1$), é muito pequena. A taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) em função da velocidade angular (Ω) é dada pela equação (9), onde R_a é o valor médio entre R_1 e R_2 .

$$\dot{\gamma} = \frac{R_a \Omega}{R_2 - R_1} \quad (9)$$

- Segundo caso, a forma da curva de fluxo é conhecida e descrita por algum modelo reológico; logo, a solução matemática da equação (7) é obtida substituindo essas equações, que descrevem esses modelos, na equação (7) e, resolvendo-se a integral [equação (7)], tem-se a equação da taxa de cisalhamento em função da velocidade angular. As principais equações utilizadas são: equação de Newton, Power Law, Bingham e Casson.

No caso de fluidos com comportamento Newtoniano, um dos mais simples, a tensão de cisalhamento (σ) é proporcional à taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) multiplicada pela viscosidade do fluido (η) ($\sigma = \eta \dot{\gamma}$), equação (5). Substituindo a equação (5) na equação (7), tem-se:

$$r \frac{d\omega}{dr} = \frac{G}{2\pi r^2} \gamma \quad (10)$$

Integrando a equação (10) para o intervalo de r variando de R_1 a R_2 e a velocidade angular de 0 a Ω , obtêm-se as seguintes equações:

$$\int_0^{\Omega} d\omega = \frac{G}{2\pi\eta} \int_{R_1}^{R_2} r^{-3} dr \rightarrow \Omega = \frac{G}{4\pi\eta} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \quad (11)$$

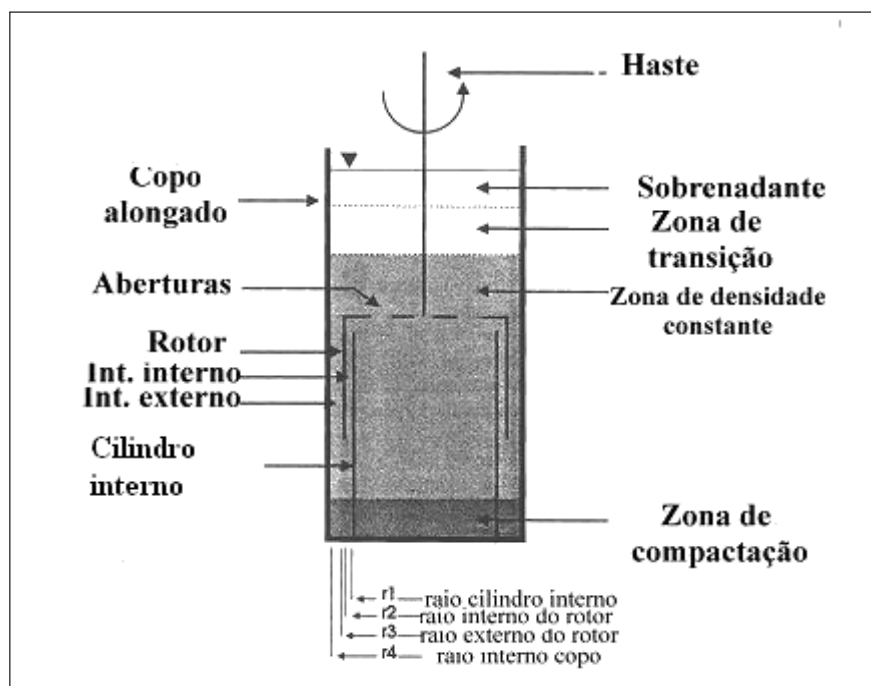


Figura 3 - Conjunto rotor ("bob") e copo para medidas de reologia de suspensões, desenvolvido por Klein et al. (1995).

Logo, a taxa de cisalhamento em função da velocidade angular, considerando que o cilindro interno gira, será dada pela equação (12).

$$\dot{\gamma}_1 = \frac{2R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \Omega \quad (12)$$

A equação (12) é de grande utilidade no processo de calibração da escala de torque do viscosímetro, conhecendo-se os valores de R_1 , R_2 e a viscosidade do fluido-padrão.

Para os demais fluidos com comportamento não-Newtoniano, descrito pelas equações de Bingham e Casson, Whorlow (1980) e Hanks (1983) descrevem as soluções da equação da taxa de cisalhamento em função da velocidade angular. Ressalta-se que a solução matemática para essas equações torna-se mais complicada devido ao fator tensão de escoamento.

- No terceiro caso, o mais complicado, considera-se que o fluido não tem uma curva de fluxo conhecida que seja descrita por algum modelo reológico. Diversas soluções são propostas para a equação (7), entre elas cita-se a solução de Kreiger (Krieger, 1968). Este autor descreve essa solução na forma de séries de Euler-MacLaurin. Outras soluções, na forma de séries, são propostas por Mooney e Thornton (Whorlow, 1980).

As principais fontes de erro no viscosímetro rotacional são: o efeito da parte inferior do rotor (end effect); o deslizamento das partículas na parede do rotor (wall effect), migração e a sedimentação de partículas durante o ensaio.

Whorlow (1980) descreve o erro causado pela parte inferior do rotor para diferentes geometrias de viscosímetro cilíndrico. Esse efeito é devido ao torque que o fluido ou suspensão exerce na base do rotor (bob ou spindle). Segundo esse autor, a geometria desenvolvida por Moore e Davis (viscosímetro de cilindro concêntrico) é a que melhor minimiza esse efeito, pois, nesse caso, a área da base disponível para influenciar no torque é muito pequena em relação à altura total do cilindro (rotor ou "bob").

A migração e o deslizamento das partículas estão bastante interligados, pois o processo de migração das partículas para as bordas do recipiente de medida, durante o cisalhamento, gera uma região, na interface do rotor e a suspensão, onde a concentração de sólido é relativamente menor. Portanto há uma maior disponibilidade de água nessa interface. Essa água atua como um lubrificante, propiciando o deslizamento das partículas e diminuindo a tensão de cisalhamento. Tais efeitos podem ser minimizados através de uma redução na taxa de cisalhamento, minimizando a força centrífuga, responsável pela migração das partículas e, também, através de pequenas ranhuras no rotor, as quais minimizam o deslizamento das partículas (Whorlow, 1980; Highgate e Whorlow, 1969 e Klein, 1982).

A sedimentação de partículas durante o ensaio causa dois tipos de problema: a) o aparecimento de uma zona com baixa percentagem de sólido, na parte superior do copo de medida, denominada de região de sobrenadante. Essa zona com baixa percentagem de sólido apresentará resultados de taxa de cisalhamento com valores inferiores aos reais que a suspensão apresentaria em condições homogêneas; b) como é comum num processo de sedimentação, o aparecimento de uma zona de compactação, na parte inferior do copo, provocará um aumento no torque e, conseqüentemente, os valores de taxa de cisalhamento serão alterados para valores superiores ao da condição em que a polpa está totalmente em suspensão, ou seja, homogênea. A Figura 3 ilustra esses efeitos durante o ensaio de reologia (Klein et al., 1992).

De forma a contornar esse problema, Klein et al. (1992) desenvolveram um método para determinação da viscosidade de uma suspensão de magnetita. Esse método consiste em realizar as medidas dos parâmetros reológicos, dentro de uma região do recipiente de medida, onde a densidade de partículas é constante, utilizando, para isto, um viscosímetro rotacional comum, incorporado a esse novo sistema, como mostra a Figura 3.

Para que as determinações dos parâmetros reológicos sejam realizadas dentro da zona de densidade constante, é necessário um estudo de caracterização do regime de sedimentação da suspensão. Assim, obtém-se um diagrama binário da localização de quatro zonas de sedimentação diferentes, tendo como ordenada a altura das interfaces e como abscissa o tempo de sedimentação. O rotor, responsável pela medida do torque, é posicionado na região de densidade constante. Para isto, de posse do diagrama, estes autores desenvolveram todo um procedimento, o qual, utilizando equações matemáticas, permite determinar a localização exata do rotor ("spindle") dentro da suspensão, minimizando, assim, o efeito da sedimentação das partículas (Klein, 1992).

6. Conclusões

A avaliação do comportamento reológico de suspensões é de grande importância no processamento mineral, uma vez que possibilita uma melhor otimização das operações, principalmente moagem, classificação e disposição de rejeitos.

Os procedimentos de medidas devem ser conduzidos de forma crítica, pois determinados desvios poderão ocasionar uma interpretação errônea dos resultados. Além disso, o comportamento reológico de uma suspensão é bastante influenciado pelos parâmetros físicos e químicos da suspensão, tais como: pH, forma e distribuição de tamanho das partículas e espécies dissolvidas.

7. Referências bibliográficas

BARNES, H. A., HUTTON, J. F., WALTERS, K. *An introduction to rheology*. 1. ed. New York: Elsevier, 1989. 199 p. (Rheology Series, 3).

CHONG, J. S., CHRISTIANSEN, E. B., BAER, A. D. Rheology of concentrated suspensions. *Journal of Applied Polymer Science*. v. 15, p. 2007-2021, 1971.

COUSSOT, P. *Mudflow rheology and dynamics*. New York: A. A. Balkema Publishers, 1997. 272p.

FIONA, S., BOGER, D. Environmental rheology for waste minimisation in the minerals industry. *Chemical Engineering Journal*. v. 86, p.319-330, 2002.

HANKS, R. W. Couette viscometry of Casson fluids. *Journal of Rheology*. v. 27, n. 1, p.1-6, 1983.

HIGHGATE, D. J., WHORLOW, R. W. End effects and particle migration effects in concentric cylinder rheometry. *Rheologica Acta*. v. 2, p.142-151, 1969.

JOHNSON, S. B., DIXON, D. R., SCALES, P. J. The electrokinetic and shear yield stress properties of kaolinite in the presence of aluminium ions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 146, p.281-291. 1999.

KAWATRA, S. K., BAKSHI, A. K. On-line measurement of viscosity and determination of flow types for mineral suspensions. *International Journal of Mineral Processing*. v. 47, p.275-283, 1996.

KLEIN, B., LASKOWSKI, J. S., PARTRIDGE, S. J. A new viscometer for rheological measurements on settling suspensions. *Journal of Rheology*. v. 39, n. 5, p.827-840. 1995.

KLEIN, B. *Rheology and stability of magnetite dense media*. Vancouver: The University of British Columbia, 1992. 442p. (Thesis of Doctor of Philosophy, Department of Mining and Mineral Process Engineering).

KOSMULSKI, M., GUSTAFSSON, J., ROSENHOLM, J. B. Correlation between the zeta potential and rheological properties of anatase dispersion. *Journal of Colloid and Interface Science*. v. 209, p.200-206. 1999.

KRIEGER, I. Shear rate in the couette viscometer. *Transactions of the Society of Rheology*, v. 12, n. 1, p.5-11, 1968.

NGUYEN, Q. D., BOGER, D. V. Measuring the flow properties of yield stress fluids. *Annual Review Fluid Mech.*, v. 24, p.47-88, 1992.

NGUYEN, Q. D., BOGER, D. V. Application of rheology to solving tailings disposal problems. *International Journal of Mineral Processing*. v. 54, p. 217-233, 1998.

**Artigo recebido em 05/01/2004 e
aprovado em 09/01/2005.**