

Propriedades Reológicas da Polpa de Bauxita – II. Avaliação do rotor tipo *vane*

Diego Goyannes de Araújo

Bolsista de Iniciação Científica, Engenheiro Química, UFRJ

Christine Rabello Nascimento

Orientadora, Engenheira Química, D. Sc.

Resumo

Neste trabalho serão apresentados os resultados obtidos das medidas reológicas feitas com um rotor do tipo *vane* e tipo cilindro coaxial. A avaliação do elemento sensor (i.e. o rotor) do reômetro rotacional se faz necessária para tentar minimizar os erros experimentais da determinação das propriedades reológicas da polpa de bauxita, considerando que características como a sedimentação rápida e a estratificação induzem o erro nas medidas. As propriedades reológicas de interesse são a viscosidade, tixotropia e tensão de escoamento, visto que essas propriedades tem grande impacto no bombeamento da polpa. Este trabalho visa aprimorar a metodologia que será empregada no estudo das propriedades reológicas da polpa de bauxita em função da variação do pH e da presença de aditivos, dando continuidade aos estudos sobre a influência da concentração, temperatura e distribuição granulométrica, realizados anteriormente. A natureza tixotrópica da polpa de bauxita foi evidenciada com ambos os rotores.

1. Introdução

Etimologicamente, o termo reologia vem do grego “rheos” (fluxo, corrente) e “logos” (ciência), ou seja, a reologia pode ser definida como o estudo da deformação e fluxo do material (Bretas & D’ávila, 2000). Considerando que o comportamento de fluxo dos materiais está intimamente relacionado com a sua estrutura, a reologia pode ser usada na investigação desta estrutura ou, dentro de uma outra abordagem, a estrutura pode ser modificada para que as propriedades reológicas desejadas sejam alcançadas.

Existem diversas formas de deformação do material, dependendo da direção da tensão que incide sobre a amostra. Todavia, este trabalho é limitado à parte da reometria em que a deformação da amostra é obtida mediante a aplicação ou medição da tensão de cisalhamento (τ). Quando o fluido se encontra entre duas placas paralelas e uma delas se movimenta em relação à outra, ocorre a deformação por cisalhamento (γ), que possui a mesma direção de τ [Figura 1 A]. Existem duas considerações fundamentais para a aplicação deste modelo: existe a aderência da camada de fluido que está em contato direto com a placa e o fluxo é laminar (ausência de turbulências). Com base neste modelo, reômetros e viscosímetros foram desenvolvidos para a determinação da viscosidade e demais propriedades reológicas dos materiais [Figura 1 B]. Como pode ser observado na Figura 1 A, a viscosidade do material pode ser calculada como a razão entre a tensão e a taxa de cisalhamento. Nos reômetros rotacionais, a taxa e a tensão de cisalhamento são, respectivamente, relacionadas à velocidade de rotação e ao torque, que são as grandezas determinadas ou controladas pelo equipamento.

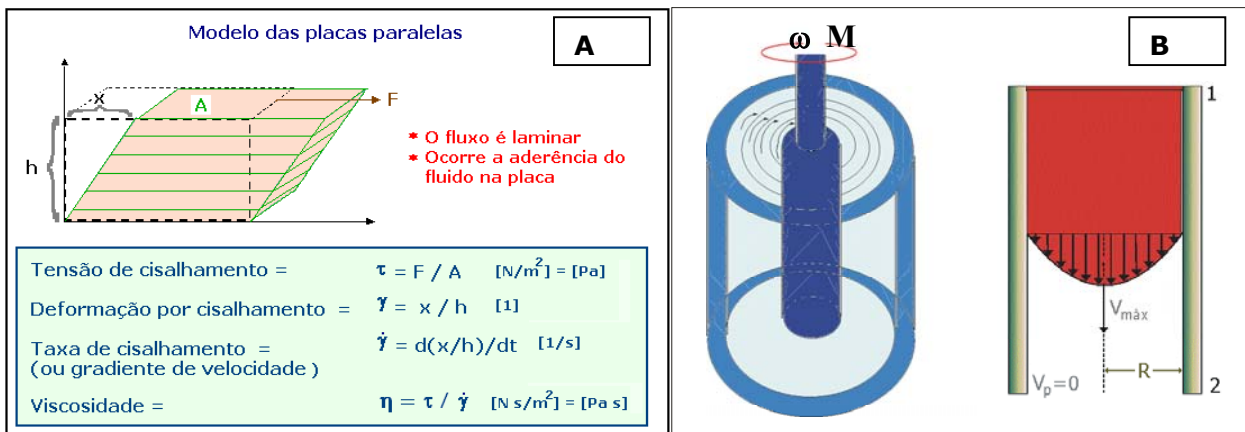


Figura 1. Propriedades reológicas obtidas com o modelo de escoamento laminar de um fluido interno a duas placas paralelas (A) e representação do fluxo laminar no interior de reômetros tipo rotacional e capilar (B). Onde ω é a velocidade angular, M é o torque, V_p é a velocidade do fluido na parede do capilar, $V_{m\acute{a}x}$ é a velocidade do fluido no centro do capilar e R é o raio do capilar.

No sentido físico, a viscosidade representa a resistência que o material oferece ao fluxo. Essa resistência tem origem no atrito interno desenvolvido pelos elementos que constituem o fluido. Assim, a presença de partículas e aglomerados, as interações entre partículas e partícula/fluido, a concentração, tamanho e formato das partículas tem influência relevante na viscosidade e demais propriedades reológicas de uma polpa de minério.

Alguns fluidos não sofrem modificação estrutural perceptível quando são submetidos à variação da taxa de cisalhamento, são os chamados fluidos Newtonianos. São fluidos de estrutura mais simples, como a água, óleo mineral, solventes e, até mesmo, algumas suspensões diluídas, em que o comportamento da fase líquida predomina. Para outros fluidos, o cisalhamento promove a orientação das partículas ou a destruição de agregados, com a liberação do líquido que estava retido no interior destes agregados. Nestes fluidos, percebe-se a queda da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento – são os chamados fluidos pseudoplásticos. Pode ocorrer, no caso de algumas suspensões concentradas submetidas à taxas de cisalhamento elevadas, que a quantidade de líquido seja apenas o suficiente para preencher o espaço entre as partículas, devido à grande quantidade de partículas originadas da destruição de aglomerados. Neste caso, restam poucas moléculas de líquido livres para o escoamento, o que é observado como um aumento da viscosidade com a taxa de cisalhamento e o fluido em questão é classificado como dilatante. Existe, ainda, uma categoria de fluidos que se comporta como fluido somente a partir de um valor mínimo de tensão de cisalhamento (τ_0), abaixo do qual o material se comporta como um sólido [Figura 2 A].

Alguns fluidos com comportamento pseudoplástico ou dilatante podem, ainda, apresentar uma dependência do tempo de cisalhamento, ou seja, estes fluidos apresentam variação da viscosidade mesmo quando submetidos à uma taxa de cisalhamento constante. Se ocorrer uma diminuição da viscosidade com o tempo, o comportamento reológico é denominado tixotrópico, enquanto que o comportamento inverso é denominado reopéxico [Figura 2 B]. A explicação dada para o comportamento tixotrópico é que a recomposição de estruturas presentes no fluido, como os agregados, é mais lenta que a sua destruição. Testes reológicos em que a amostra é submetida ao

aumento da taxa de cisalhamento seguido pela diminuição da taxa servem para observar a tixotropia do material, cuja ocorrência é verificada quando a curva de aumento da taxa não coincide com a curva de decréscimo da taxa no gráfico de $\tau \times \dot{\gamma}$, formando uma curva de histerese [Figura 2 B]. O histórico de cisalhamento influencia consideravelmente esses dois comportamentos (Pardo, 2005).

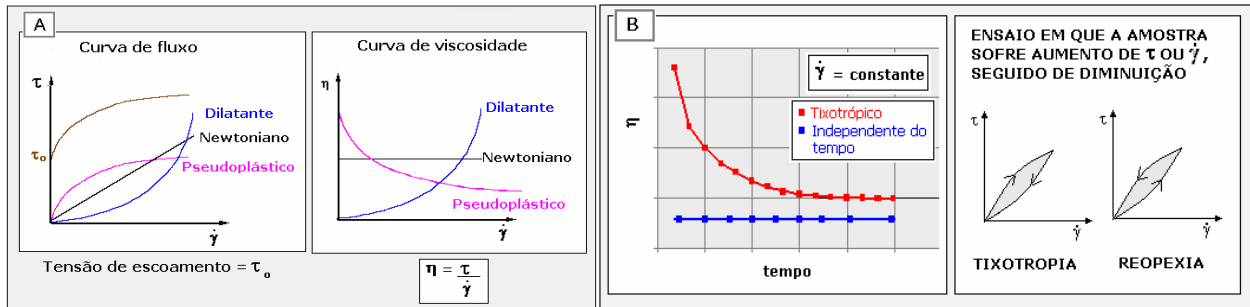


Figura 2. Tipos de fluidos observados pelas curvas de fluxo e de viscosidade (A) e comportamento tixotrópico observado em testes reológicos típicos (B).

2. Rotores do Tipo Vane

Geralmente, os rotores do tipo cilindros coaxiais são os mais adequados para as amostras de média ou baixa viscosidade, no caso em que os ensaios reológicos são executados em reômetro rotacional. Contudo, a necessidade de superar dificuldades experimentais na análise de suspensões, tais como o deslizamento na superfície do rotor, sedimentação rápida e a estratificação devido aceleração centrífuga durante a análise, acarretou no desenvolvimento de rotores com ranhuras e com o formato de hélices (tipo *vane*). Apesar da literatura (Marquez et al., 2006; Dzuy & Boger, 1983; Coussot, 2005) reportar o uso dos rotores tipo *vane*, indicando-os como os mais adequados, é importante salientar que as suas características geométricas os tornam impróprios para determinações reométricas absolutas. Como consequência dessa geometria, as relações demonstradas na Figura 1 A não são mais válidas e há a necessidade de se recorrer a uma curva de calibração, feita com um padrão de viscosidade conhecida, para que a viscosidade da amostra seja determinada. Na Figura 3 estão as fotografias dos rotores Z34 DIN Ti (tipo cilindro) e 2blade-ref 222-1599 (tipo *vane*), utilizados neste trabalho.

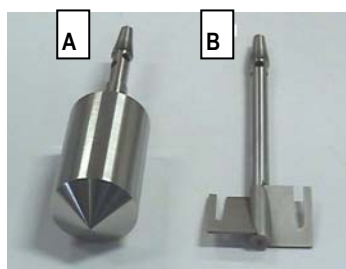


Figura 3. Rotores Z34 DIN Ti (tipo cilindro)(A) e 2blade-ref 222-1599 (tipo *vane*) (B).

3. Materiais e Métodos

A amostra de polpa de bauxita originária da região de Paragominas (Pará, Brasil) foi homogeneizada por agitação mecânica e fracionada em quantidades menores. A concentração da polpa foi calculada como a razão entre o peso da amostra seca e o peso da amostra de polpa, o que resultou em 0,5g/g.

3.1 - Ensaio reológico

Foi utilizado um reômetro da marca HAAKE, modelo RheoStress 1. As condições dos testes são mostradas a seguir.

3.1.1 – Com o rotor tipo cilindro Z34 DIN Ti: rampa de aumento de taxa de cisalhamento de 0 a 200 s⁻¹ em 100 s, adquirindo 100 pontos; permanência a 200 s⁻¹ por 15 s, adquirindo 10 pontos; rampa de diminuição de taxa de cisalhamento de 200 a 0 s⁻¹ em 100 s, adquirindo 100 pontos.

3.1.2 – Com o rotor tipo *vane* 2blade-ref 222-1599:

3.1.2.1 – Teste de rampa de velocidade de rotação: rampa de aumento de velocidade de rotação de 0,09 a 300 RPM em 100 s, adquirindo 100 pontos; permanência a 300 RPM por 15 s, adquirindo 10 pontos; rampa de diminuição de velocidade de rotação de 300 a 0,09 RPM em 100 s, adquirindo 100 pontos.

3.1.2.2 – Testes com velocidade de rotação constante ao longo do tempo: foram utilizadas rotações de 5, 15, 50, 100, 200 e 300 RPM durante 600 s de teste.

Todos os testes foram realizados a 25°C.

Obs: A reprodução exata das condições de análise com a utilização de ambos rotores é inviável devido à geometria do rotor *vane*, que não proporciona um cisalhamento uniforme ao longo da amostra. Isto impossibilita uma comparação mais precisa entre os rotores, sobretudo no caso de amostras tixotrópicas.

4. Resultados e Discussão

Na Figura 4 A estão os resultados do teste com o rotor *vane*, cuja programação executada (rampa de velocidade de rotação) aparece no gráfico de $\Omega \times t$. A curva de tensão de cisalhamento ($\tau \times t$) resultante possui perfis distintos para cada etapa da programação, ou seja, o perfil obtido quando a velocidade de rotação é aumentada não coincide com aquele obtido na etapa de diminuição da velocidade. A assimetria na curva de $\tau \times t$ ocorre também no ensaio feito com cilindro coaxial (Figura 4 B), usando uma programação semelhante. O perfil da curva parece depender mais fortemente do tipo de rotor do que da condição de análise visto que, em estudos anteriores, perfis similares foram obtidos com o rotor tipo cilindro, utilizando tempos de rampa diferentes. As implicações dessa assimetria da curva com as mudanças estruturais da polpa é uma matéria complexa que deverá ser investigada posteriormente.

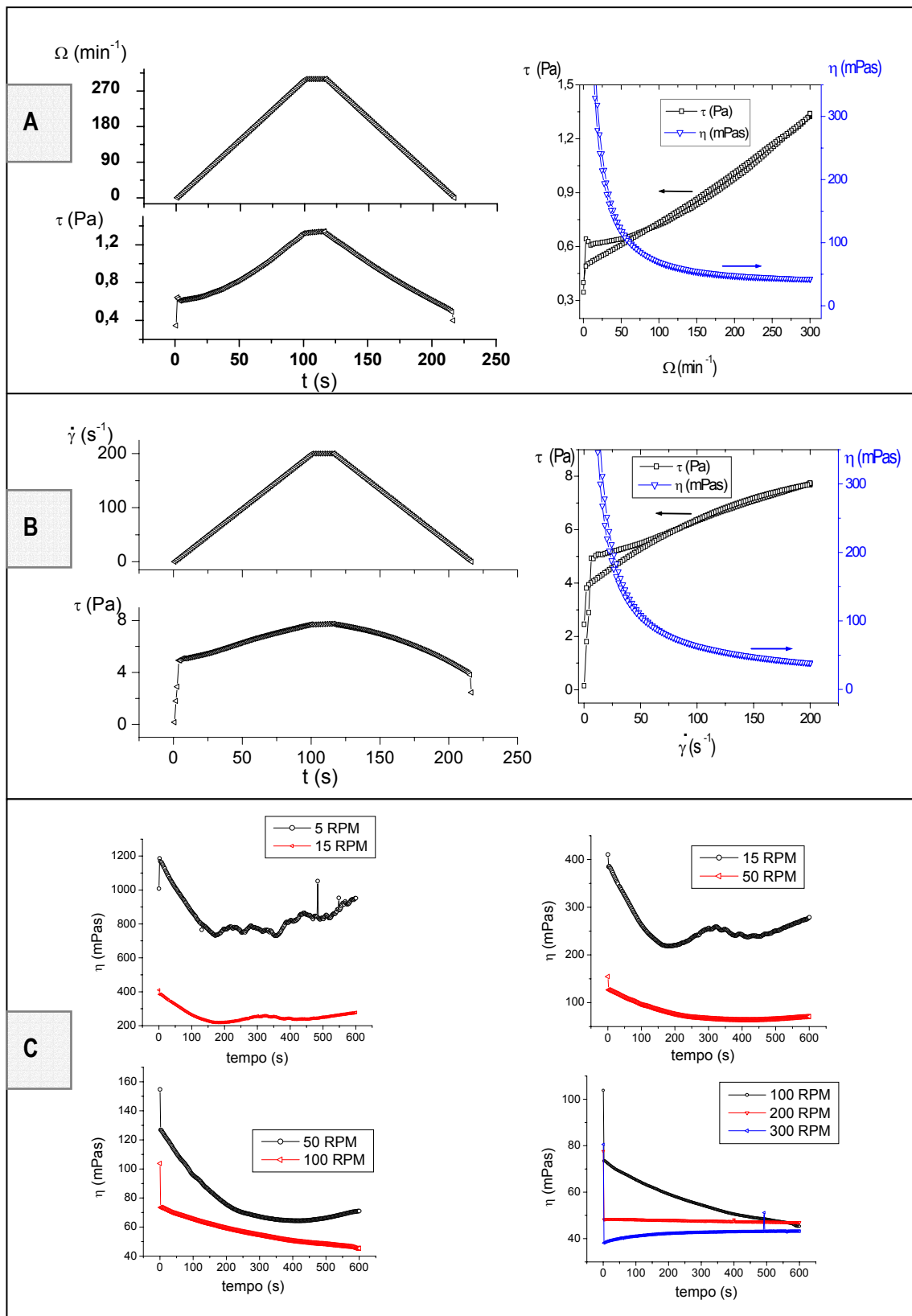


Figura 4. Quadro de resultados: comportamento reológico observado nos testes de aumento seguido de diminuição da velocidade de rotação (Ω) ou da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), utilizando os rotores *vane* (A) e cilindro coaxial (B); variação da viscosidade (η) com o tempo de cisalhamento, utilizando o rotor *vane* e velocidades de constantes de rotação (C).

A tixotropia da amostra pode ser observada no teste de rampa pela presença da curva de histerese (curvas de τ x $\dot{\gamma}$, na Figura 4 B). O valor numérico da tixotropia pode ser calculado como a diferença entre as áreas sob as curvas ascendente e descendente do gráfico de τ x $\dot{\gamma}$. No caso do ensaio com cilindro, este valor é bem pequeno (1,7 Pa/s). O mesmo ocorre quando o rotor *vane* é usado e, desta forma, observa-se uma quase sobreposição das curvas de viscosidade no gráfico η x Ω , Figura 4 A. Os testes de rampa de taxa de cisalhamento devem ser analisados com cuidado na avaliação da tixotropia pois, sendo a amostra sensível ao tempo de pré-cisalhamento, o valor de tixotropia irá variar com o tempo de rampa. Por exemplo, uma amostra que sofre cisalhamento numa faixa de 10 a 100 s⁻¹ por um minuto permanece mais tempo sob cisalhamento do que outra amostra idêntica que é submetida à mesma faixa de taxa de cisalhamento por 10 segundos. Como a tixotropia também é função do tempo, os valores obtidos nos dois testes não serão os mesmos.

Na Figura 4 C estão os resultados de um outro tipo de teste de tixotropia, utilizando o rotor *vane*. Neste caso, foram utilizadas velocidades de rotação fixas e verificada a variação da viscosidade com o tempo. Com a utilização de velocidades baixas (5 e 15 RPM) já é observada a queda da viscosidade com o tempo, característica de materiais tixotrópicos. Contudo, após 170 segundos de teste, ocorrem oscilações incomuns da viscosidade. Apesar do rotor utilizado ter sido projetado para evitar a sedimentação durante a análise, as alterações observadas indicam que fenômenos que afetam a homogeneidade da amostra, tais como a sedimentação/ resuspensão ou a formação/destruição de aglomerados, podem estar ocorrendo aleatoriamente. Estas instabilidades não são observadas quando velocidades mais altas são usadas. A tixotropia também pode ser visualizada nos testes com as velocidades de 50 e 100 RPM. Observa-se que os valores de viscosidades foram cada vez mais baixos conforme aumentou a velocidade, provavelmente em decorrência da maior redução do tamanho dos aglomerados. Com 200 RPM praticamente não é detectada nenhuma variação na viscosidade com o tempo, indicando que os aglomerados foram instantaneamente destruídos. O fenômeno de reopexia pôde ser observado no teste com 300 RPM provavelmente devido ao número excessivo de partículas formadas com a destruição de agregados mais estáveis.

Observa-se no gráfico de τ x t (Figura 4 B) uma queda brusca da resistência ao escoamento após 3,8 segundos de teste, quando a tensão de cisalhamento atinge 4,93 Pa. Este valor de tensão não se enquadra rigorosamente na conceituação adotada para tensão de escoamento, visto que houve deformação em tensões mais baixas. Isto significa que o material não assume exatamente o comportamento de um sólido quando em está repouso. Em todo caso, quando é atingido esse valor de tensão, ocorre uma nítida transição no comportamento de fluxo do material, ou seja, a estrutura deixa de oferecer uma resistência ao escoamento tão elevada a partir deste valor de tensão.

5. Conclusões

- O comportamento pseudoplástico e tixotrópico da polpa de bauxita foi identificado usando os dois rotores;

- Foram observadas instabilidades na curva de viscosidade *versus* tempo com o uso do rotor *vane*, em velocidades baixas de rotação;
- O comportamento reopéxico foi observado com o uso do rotor *vane*, na velocidade de rotação de 300 RPM.
- No ensaio feito com rotor cilíndrico, foi observada uma queda brusca da resistência ao escoamento após 3,8 segundos de teste, quando a tensão de cisalhamento atingiu 4,93 Pa.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CETEM, ao CNPq e a Precilabo Instrumental por todo o apoio dado a este trabalho.

7. Referências Bibliográficas

- BRETAS, R.; D'ÁVILA, M. **Reologia dos Polímeros Fundidos**. São Carlos, São Paulo, Brasil. 2000.
- PARDO, A. R.F. **Processamento Viscoplastico e Conformação Cerâmica por Rolos a Frio a Partir de Suspensões Concentradas de Alumina**. 2005. 28 – 35p. Dissertação (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo (Brasil).
- MARQUEZ, M.; ROBBEN, A.; GRADY, B.P.; ROBB, I. Viscosity and Yield Stress Reduction in Non-Colloidal Concentrated Suspensions by Surface Modification with Polymers and Surfactants and/or Nanoparticle Addition. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 295, p. 374–387, 2006.
- DZUY, N. Q. & BOGER, D. V. Yield Stress Measurement for Concentrated Suspensions. **Journal of Rheology**, v.27, N.4, p. 321-349, 1983.
- COUSSOT, P. **Rheometry of Pastes, Suspensions, and Granular Materials - Applications in Industry and Environment**. John Wiley & Sons, Inc., 2005.