

Propriedades Reológicas da Polpa de Bauxita – I. Estudo da Influência da Concentração e da Distribuição Granulométrica

Lilian Casseiro Sampaio
Bolsista de Iniciação Científica, Engenheira Química, UFRJ

Christine Rabello Nascimento
Orientadora, Engenheira Química, D. Sc.

Resumo

No presente trabalho serão discutidas as propriedades reológicas da polpa de bauxita, especificamente a viscosidade, a tixotropia e a tensão no ponto de escoamento, em função da variação da distribuição granulométrica e da concentração da polpa. Todas as propriedades foram obtidas em regime permanente de cisalhamento, por meio de um reômetro tipo cilindros coaxiais. As curvas de fluxo e de viscosidade foram obtidas com o aumento seguido pela diminuição da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), o que possibilitou verificar a natureza tixotrópica do material. Visto que as propriedades reológicas estão intrinsecamente relacionadas à estrutura do material, o mesmo foi caracterizado por difração de raios-X, fluorescência de raios-X, análise da distribuição de tamanhos de partículas (espalhamento de luz) e classificação granulométrica (série Tyler $\sqrt{2}$). O enriquecimento da polpa com a fração mais fina de bauxita acarretou na redução da viscosidade e da tensão no ponto de escoamento, enquanto que o aumento de concentração levou ao aumento dessas propriedades.

1. Introdução

O estudo reológico dos materiais tem importância relevante para o entendimento da relação estrutura/performance de sistemas multifásicos, tais como tintas, alimentos, medicamentos e fluidos biológicos (Mazzeo, 2005). Além da sua importância para o desenvolvimento da ciência dos materiais, a caracterização reológica serve como ferramenta para o controle de qualidade de produtos e a otimização de processos em diversos segmentos industriais.

1.1- Reologia

Reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria (Bretas & D'ávila, 2000). Dentro deste contexto, os estudos reológicos consistem na análise da resposta de um dado material em termos de deformação (quando for aplicada uma tensão) ou em termos de tensão, quando a amostra é submetida a uma deformação conhecida.

No tocante ao processo de bombeamento, uma das propriedades reológicas mais importantes é a viscosidade dinâmica (η) do fluido a ser bombeado, sendo este, inclusive, um parâmetro utilizado na escolha das bombas que serão utilizadas. Em resumo, a viscosidade representa a resistência do material ao fluxo, ou seja, quanto maior for a viscosidade de um fluido, maior será a energia necessária para a sua locomoção através de dutos. Portanto, quanto menor for a viscosidade do material, maior será a facilidade do seu transporte por minerodutos.

A viscosidade de uma suspensão é função de fatores tais como a sua composição (distribuição do tamanho, carga superficial e formato das partículas) e concentração; da temperatura; do pH e da presença de sais e outros aditivos, portanto, a manipulação destes fatores pode servir para a modificação da viscosidade. Como a grande maioria das suspensões concentradas não possui comportamento Newtoniano, a viscosidade também sofre variação com a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), o que significa que a viscosidade varia com a vazão aplicada no bombeamento ou em qualquer outro processo. Conseqüentemente, a determinação do perfil da curva de viscosidade deve ser feita dentro de uma faixa de taxas de cisalhamento que inclua as taxas usualmente aplicadas no processo de bombeamento, que fica em torno de 100 s^{-1} . Na Figura 1 estão relacionados os tipos de fluidos, classificados segundo o perfil de suas curvas de fluxo e de viscosidade.

Para algumas suspensões, a cinética de destruição dos agregados, que ocorre quando se aumenta a taxa de cisalhamento, difere significativamente da cinética de formação de agregados. Como efeito tem-se que a curva da variação da viscosidade (ou da tensão) em função da taxa de cisalhamento, obtida quando o fluido é acelerado ($\dot{\gamma}$ aumenta com o tempo), não coincide com a curva de desaceleração do fluido ($\dot{\gamma}$ diminui com o tempo). Dá-se o nome de tixotropia ao fenômeno observado quando o processo de recomposição da estrutura é mais lento que o processo de destruição da estrutura inicial. Já os materiais reopéticos, extremamente raros, apresentam o processo de recomposição da estrutura mais rápido do que o processo de destruição (Figura 2).

O estudo reológico também pode fornecer medidas comparativas sobre a estabilidade de suspensões. Quanto maior a estabilidade da suspensão, menor será sua tendência à formação de sedimentos que podem causar o entupimento da tubulação. Um parâmetro que pode ser determinado com base na curva de tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento ($\tau \times \dot{\gamma}$) é a tensão no ponto de escoamento (τ_0). Sabe-se que quanto maior for o valor de τ_0 , menor será a tendência de sedimentação da suspensão. Contudo, deve-se observar que valores elevados de τ_0 podem sobrecarregar as bombas e até queimá-las.

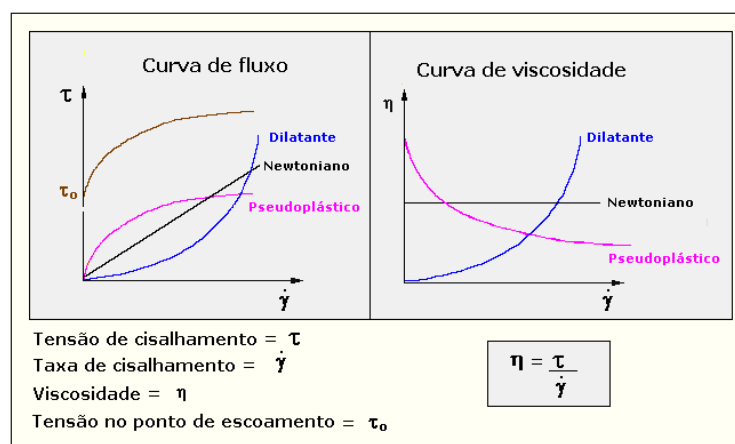


Figura 1. Curvas típicas de fluxo e de viscosidade.

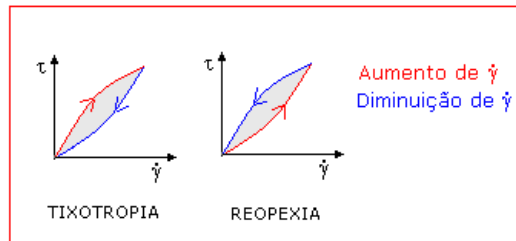


Figura 2. Curvas de histerese de fluidos tixotrópicos e reopéticos

1.2- Bauxita

A rocha de bauxita é composta por uma mistura impura de minerais de alumínio dentre os quais os mais importantes são: a gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$, diásporo $\text{AlO}(\text{OH})$ e boehmita $\text{AlO}(\text{OH})$, conhecidos como oxi-hidróxidos de alumínio. As proporções destes minerais variam muito, bem como o tipo e a quantidade de impurezas no minério, como óxido de ferro, argila, sílica, dióxido de titânio, por exemplo. Para ser considerada economicamente aproveitável, a bauxita deve apresentar um teor de alumina (Al_2O_3) de 50% a 55%. A coloração da rocha varia de branca a vermelha conforme o teor de óxido de ferro, que pode atingir uma proporção de 25%.

A lavra do minério de bauxita é feita, na maioria das vezes, a céu aberto usando o método de lavra por tiras, com um nível de mecanização bastante diversificado. Como parte das impurezas existente na bauxita está relacionada à presença de minerais de alumínio, o beneficiamento da bauxita por meios mecânicos pode até ser inviabilizado. Métodos como a britagem, atrição e peneiramento servem para a remoção da argila. A redução dos teores de Fe_2O_3 e TiO_2 pode ser feita via separação magnética

A maior parte da bauxita é usada para o processamento do alumínio metálico, obtido pelo processo Bayer sucedido pelo processo Hall-Héroult (Figura 3). As demais aplicações, que consomem cerca de 5% da bauxita beneficiada, consistem na obtenção de produtos químicos, abrasivos, materiais refratários e cimentos de alta alumina. O Brasil produz cerca de 8% da bauxita mundial, tendo 3,52 bilhões de toneladas em reservas.

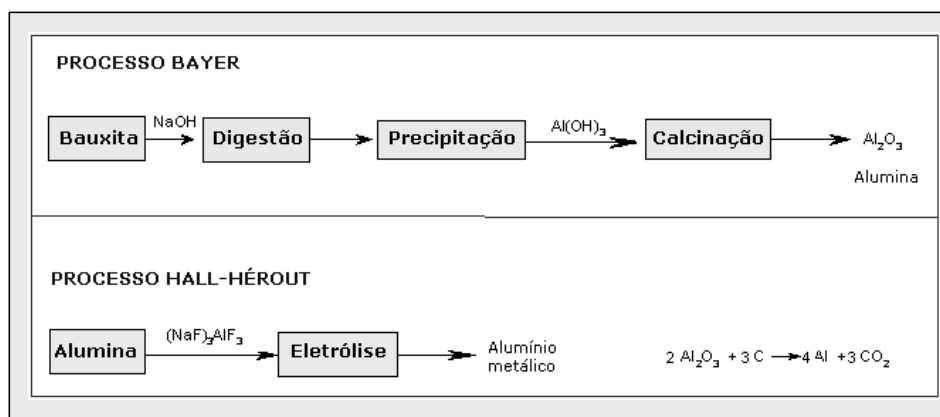


Figura 3. Obtenção do alumínio metálico pelos processos Bayer e Hall-Héroult.

2. Materiais e métodos

A amostra de polpa de bauxita originária da região de Paragominas (Pará, Brasil) foi homogeneizada por agitação mecânica, sendo separada uma porção de 20 L para a realização todas as análises. 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 (50% em massa de bauxita).

2.1 – Análise granulométrica

A classificação granulométrica foi feita para uma amostra com aproximadamente 2,5 L de polpa, com a utilização da série Tyler $\sqrt{2}$, com peneiras de 48 a 400 meshes. As sete frações retidas nas peneiras foram secas, pesadas e reservadas para utilização posterior.

2.2 - Ensaios reológicos

Foi utilizado um reômetro da marca HAAKE, modelo RheoStress 1, com sensor tipo cilindros coaxiais Z34 DIN Ti. As condições escolhidas para os testes foram as seguintes:

- (i) rampa de aumento de taxa de cisalhamento de 0 a 200 s⁻¹ em 100 s, adquirindo 100 pontos;
- (ii) permanência a 200 s⁻¹ por 15 s, adquirindo 10 pontos;
- (iii) rampa de diminuição de taxa de cisalhamento de 200 a 0 s⁻¹ em 100 s, adquirindo 100 pontos.

Os testes foram realizados a 25°C e em triplicata, sendo escolhida a curva mediana como o resultado final. O valor de tixotropia, que é a área entre as curvas de fluxo, foi calculado pelo *software* do equipamento.

2.3 – Análise semi-quantitativa de fluorescência de raios-X

Análise efetuada em aparelho Breker-axs do Brasil (Mod. S-4 Explorer) com tubo de ródio.

2.4 – Análise de difração de raios-X (DRX)

A análise foi realizada em um equipamento Bruker-AXS D5005, com radiação Co K α . O difratograma foi obtido pelo método do pó, na faixa de 5 a 80° (2 θ) e a interpretação qualitativa foi efetuada por comparação com padrões contidos no banco de dados PDF02 (ICDD, 1996) em *software* Bruker Diffrac^{Plus}.

2.5 - Análise de distribuição de tamanhos de partículas

A análise de distribuição de tamanhos de partículas foi realizada em equipamento de espalhamento de luz (Mastersizer 2000 da Malvern). Para esta análise, foi utilizada uma amostra da fração de bauxita que passou na peneira de 400#. Foi feita uma suspensão diluída com a amostra, sendo adicionado 8 mL de dispersante (hexametáfosfato de sódio). A suspensão foi colocada por 4 minutos no aparelho de ultra-som antes da análise a fim de desagregar os possíveis aglomerados

3. Resultados e discussão

Pelos resultados da classificação granulométrica (Tabela 1), pode-se observar a predominância de material fino (amostra 7), que passou pela malha de 400 mesh. Pela análise química (Figura 4) foi constatado que essa amostra, quando comparada com as demais amostras analisadas, é a mais pobre em alumínio e a mais rica em ferro e sílica. As outras frações (Amostras 3, 4 e 5) são bastante homogêneas entre si. Todas as frações possuem um alto teor de material volátil, sendo que a perda ao fogo ficou na faixa de 27,7 a 24%. Esta perda ao fogo está, provavelmente, relacionada à água estrutural da gibbsita. O resultado da análise de difração por raios-X demonstrou que os principais minerais da amostra 7 foram gibbsita, hematita e caulinita. Como resultados da análise de distribuição de tamanhos de partículas, efetuada para a amostra 7, tem-se que 10% das partículas possuem tamanhos abaixo de 1 μm , 50% estão abaixo de 7 μm e 90% são menores que 38 μm .

Tabela 1. Análise granulométrica de uma amostra de bauxita lavada

Número da amostra	Peneira #	% Retido
1	+ 48#	0,3
2	-48 +65#	5,3
3	-65 +100#	9,0
4	-100 +150#	12,6
5	-150 +270#	21,3
6	-270 +400#	6,0
7	- 400#	45,4

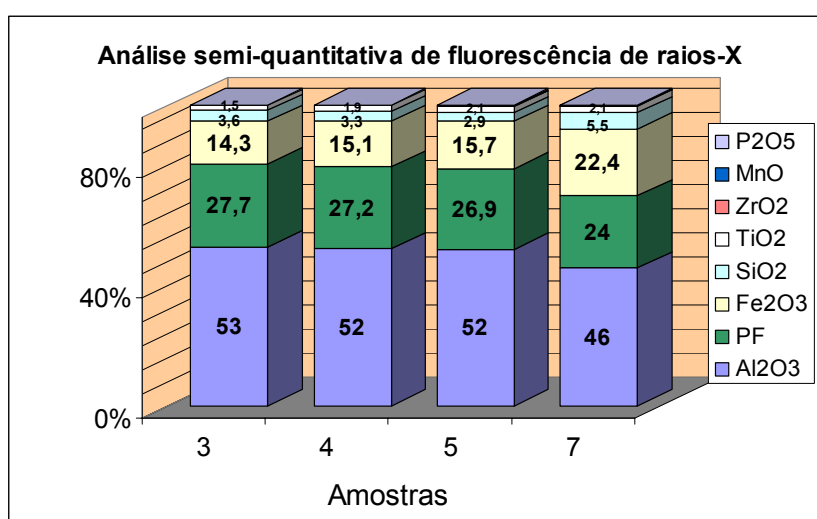


Figura 4. Resultados da análise de fluorescência de raios-X para as frações mais abundantes de bauxita.

No estudo sobre a influência da adição de finos, quantidades pré-determinadas da amostra 7 foram adicionadas à polpa e a concentração foi corrigida pela adição de água. Observa-se um nítido decréscimo nos valores de tensão no ponto de escoamento (τ_0) e de viscosidade (η) conforme o percentual da quantidade de finos adicionada aumentou (Figura 5). Este não era o comportamento esperado já que a viscosidade deve aumentar com o aumento das forças de atração entre as partículas, que ocorre quando o tamanho de partículas diminui (Garcia et al., 2003). O enriquecimento da amostra de polpa com o material mais fino acarretou numa queda de viscosidade de até 13 Pas quando as amostras atingiram a taxa de cisalhamento de 100 s^{-1} , que é a taxa média usual nos processos de bombeamento. Isto significa que esta modificação contribui para a diminuição da energia requerida para esse processo. Em contrapartida, a queda observada para os valores de τ_0 indica que a tendência à sedimentação da suspensão aumenta. Com a adição de finos, os valores de tixotropia passaram de positivos (16 Pas^{-1} , 0% de adição) para negativos (-39 Pas^{-1} , 30% de adição), indicando a mudança do predomínio do caráter tixotrópico para reopético.

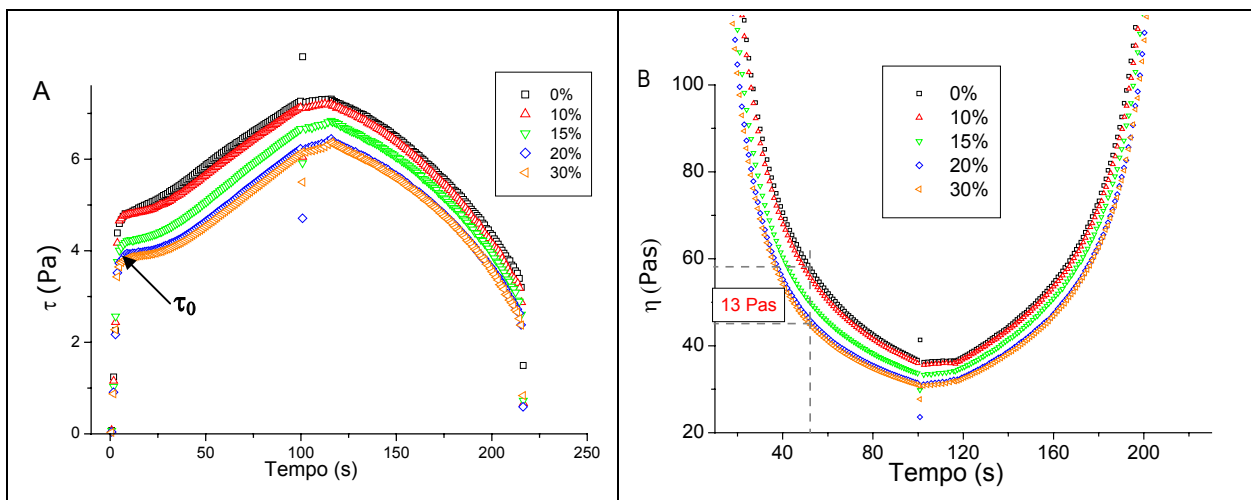


Figura 5. Curvas de tensão de cisalhamento *versus* tempo de teste (A) e viscosidade *versus* tempo de teste (B) da amostras de polpa de bauxita modificadas pela adição da fração mais fina em diversos percentuais, com concentração constante.

A concentração teve efeito relevante sobre as propriedades reológicas. Tanto a viscosidade como a tensão no ponto de escoamento tendem a aumentar com o aumento da concentração (Figura 6). Na taxa de cisalhamento, usual no processo de bombeamento (100 s^{-1}), a diferença de viscosidade entre as amostras chega a 109 Pas, quando a amostra está sendo acelerada (Figura 6, curva B), e a 151 Pas quando a amostra está sendo desacelerada. Observou-se nitidamente a mudança da natureza tixotrópica para a reopética, na medida em que a concentração aumentou (Figura 6, curva A). O ponto de inversão entre as duas naturezas ocorre quando a suspensão possui uma concentração de aproximadamente 50% em peso. Isto faz com que essa amostra comporte-se reologicamente de maneira mais estável no tocante ao processo de aceleração e desaceleração do fluxo.

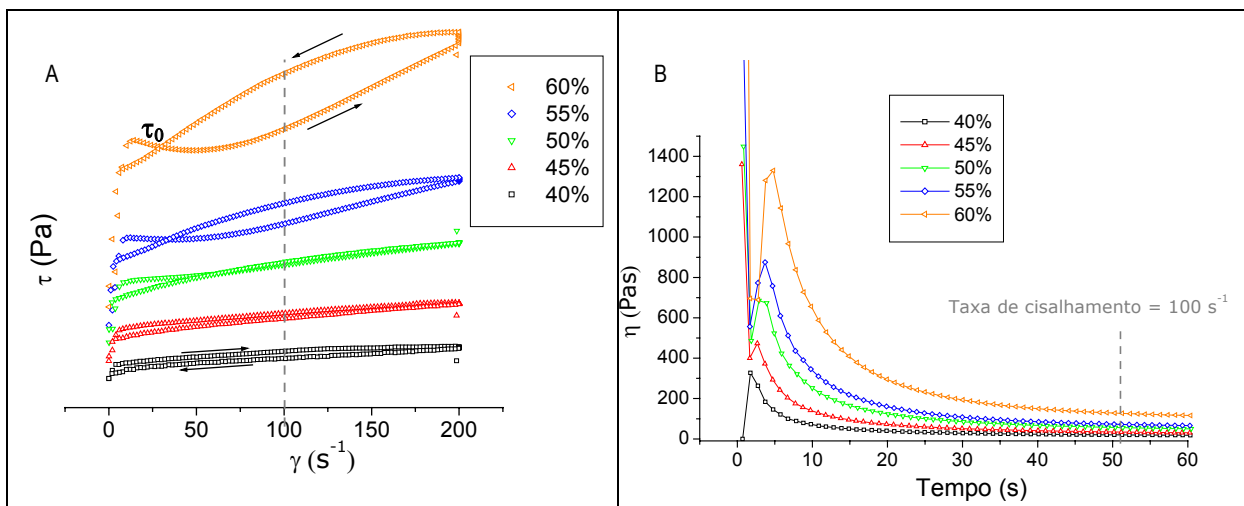


Figura 6. Curvas de fluxo (A) e de viscosidade *versus* tempo de teste (B) de amostras de polpa de bauxita com diferentes teores de sólidos. Parte do teste em que ocorre o aumento da taxa de cisalhamento(B).

4. Conclusões

Neste estudo foi observado que o enriquecimento da polpa com a fração mais fina de bauxita acarretou na redução da viscosidade e da tensão no ponto de escoamento, enquanto que o aumento de concentração levou ao aumento dessas propriedades. Na medida em que a concentração aumentou (numa faixa de 40 a 60% p/p), ocorreu a mudança da natureza tixotrópica para a reopética.

5. Agradecimentos

CNPq pelo apoio financeiro e ao CETEM pela estrutura laboratorial na realização deste trabalho.

6. Referências Bibliográficas

- BRETAS, R.; D'ÁVILA, M. **Reologia dos Polímeros Fundidos**. São Carlos, SP, Brasil. 2000.
- GARCIA, F.; Le BOLAY, N.; FRANCES, C. Rheological behaviour and related granulometric properties of dense aggregated suspensions during an ultrafine comminution process. **Powder Technology**, v.130, p.407-414, 2003.
- MAZZEO, F. **Rheology Importance to Various Industries**. Gemini HRnano Rheometer, dez. 2005. Disponível em <http://www.brainshark.com/brainshark/vu/view.asp?pi=126271> Acesso em: 18 jan. 2006.