

# **INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS, DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA, DO pH E DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DA POLPA DE BAUXITA**

C. N. Barbato<sup>1,2</sup>, S. C. A. França<sup>2</sup>, M. Nele<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Av. Horácio Macedo, 2030, Edifício do Centro de Tecnologia, Bloco E/Sala 200, Rio de Janeiro, RJ, 21941-909. e-mail: [carla.barbato@ig.com.br](mailto:carla.barbato@ig.com.br)

<sup>2</sup> Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCT

Av. Pedro Calmon, 900, Rio de Janeiro, RJ, 21941-908. e-mail: [sfranca@cetem.gov.br](mailto:sfranca@cetem.gov.br)

## **RESUMO**

No Norte do Brasil, a polpa de bauxita é transportada da usina de beneficiamento por meio de dutos até a refinaria de produção de alumina, num percurso de 244 km de extensão. Durante o bombeamento e o transporte das polpas minerais no mineroduto, estas não devem ter um comportamento reopético o que é extremamente prejudicial ao processo, na medida em que pode levar a obstrução dos dutos. Desta forma, é muito importante controlar as variáveis de preparo das polpas minerais a fim de obter um comportamento reológico adequado ao transporte das polpas através do mineroduto. As variáveis de preparo das polpas são a concentração de sólidos, a temperatura, a forma e a distribuição de tamanho de partículas e o pH, entre outros. Dentro do contexto acima, este trabalho teve a finalidade de verificar a influência das variáveis de preparo da polpa de bauxita no comportamento reológico. As polpas de bauxita caracterizaram-se pelo comportamento tixotrópico. Dentre as variáveis de preparo da polpa, a concentração de sólidos é a variável que possui maior influência direta na tensão de escoamento, já o diâmetro médio das partículas influencia inversamente. O efeito do pH e da temperatura não foram estatisticamente significantes.

**PALAVRAS-CHAVE:** bauxita, mineroduto, reologia, tixotropia.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país com grande extensão territorial e as atividades de mineração encontram-se, geralmente, distantes dos centros de produção ou consumo. O transporte de minérios pela malha rodoviária ou ferroviária é dispendioso ou carece de infraestrutura adequada, o que torna atrativa a opção do seu transporte sob a forma de polpa, via minerodutos.

O primeiro mineroduto de polpa de bauxita do mundo está localizado no Pará com 244 km de comprimento. A polpa possui as seguintes características: 47-52% de sólidos (em peso) e distribuição granulométrica, conforme ilustrado na Figura 1. A vazão média durante o transporte é aproximadamente 1860 m<sup>3</sup>/h, que corresponde a uma velocidade de 1,5 a 1,8 m/s (Gandhi *et al.*, 2008).

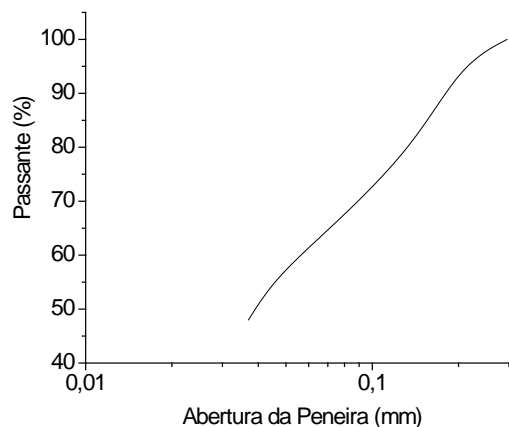


Figura 1 – Distribuição granulométrica da polpa de bauxita transportada no mineroduto da Vale localizado no Pará.

Durante o escoamento de polpas minerais no mineroduto, estas não devem ter um comportamento reopético, o que é extremamente prejudicial ao processo, na medida em que pode ocorrer a obstrução dos dutos durante o escoamento (Klein e Hallbom, 2002).

Dentro do contexto acima, o presente trabalho tem como finalidade verificar a influência das variáveis de preparo da polpa de bauxita, tais como: concentração de sólidos, diâmetro médio das partículas, pH e temperatura no comportamento reológico da polpa.

## 2. MATERIAS E MÉTODOS

A bauxita utilizada neste trabalho é proveniente do Nordeste do Pará e é constituída, basicamente, pelos minerais gibbsita e caulinita. O processo de beneficiamento foi realizado segundo a metodologia descrita por Silva *et al.* (2010). As etapas de beneficiamento consistiram de britagem e moagem.

As distribuições granulométricas das partículas, utilizadas neste trabalho, foram baseadas nas condições industriais de transporte da polpa de bauxita no mineroduto, localizado no estado do Pará, na qual a distribuição granulométrica é 6% retido em 0,208 mm e 40 a 47% passante em 0,043 mm (Ganghi *et al.*, 2008).

O potencial zeta das partículas foi determinado no equipamento DT 1200 fabricado pela *Dispersion Technology*. As polpas foram preparadas com 10%(p/p) de bauxita e 0,01 M de KCl para manter as forças

iônica constante. As medidas de potencial zeta foram efetuadas nos valores de pH no intervalo de 2,0 a 12,5. O pH foi ajustado com soluções diluídas de KOH e HCl.

As condições experimentais de preparo das polpas (Tabela I) basearam-se no planejamento de experimentos  $2^{4-1}$ , com ponto central (Box *et al.*, 1978). Três réplicas foram realizadas no ponto central (ensaios 9 a 11) com a finalidade de estimar o erro experimental e a curvatura do modelo empírico.

Tabela I - Condições de Preparo das Polpas de Bauxita, de acordo com o Planejamento de Experimentos  $2^{4-1}$  com Ponto Central.

Ensaios	T (°C)	TM (min)	CS (% p/p)	pH
1	25	30	50	7
2	45	30	60	7
3	45	40	50	7
4	25	40	60	7
5	45	30	50	12
6	25	30	60	12
7	25	40	50	12
8	45	40	60	12
9	35	35	55	9,5
10	35	35	55	9,5
11	35	35	55	9,5

T- Temperatura, TM- Tempo de Moagem e CS- Concentração de Sólidos

O comportamento reológico das polpa preparadas de acordo com as condições descritas na Tabela I, foi determinado no reômetro AR-G2, fabricado pela *TA Instruments*, com a geometria cilindros coaxiais.

A programação utilizada para avaliar o comportamento reológico das polpas foi a seguinte: a polpa foi submetida a uma taxa de cisalhamento de  $200 \text{ s}^{-1}$  por 60 s, em seguida esta foi cisalhada a uma taxa de  $1 \text{ s}^{-1}$  por 60 s. A intensidade da tixotropia/reopexia foi avaliada pela determinação do tempo de reconstrução das redes tridimensionais formadas pelas partículas em baixas taxas de cisalhamento.

A regressão dos dados experimentais do tempo de reconstrução (TR) das redes tridimensionais formadas pelas partículas baseou-se na metodologia de análise de planejamento de experimentos com ponto central (Box *et al.*, 1978). Os valores de TR obtidos foram ajustados por uma equação polinomial de 1ª ordem (Equação 1). As variáveis independentes ( $X_i$ ) são: a concentração de sólidos (CS), o diâmetro médio das partículas (DM), a temperatura (T) e o pH. Os coeficientes estimados são representados pela letra *a*. Na equação,  $a_i$  é o coeficiente linear relacionado à variável *i* (concentração de sólidos, diâmetro médio das partículas, temperatura e pH) e  $a_{ij}$  é o coeficiente relacionado à interação entre as variáveis *i* e *j*.

$$TR = a_0 + \sum_i^4 a_i X_i + \sum_{i<j}^4 a_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O potencial zeta é útil para avaliar a intensidade das forças elétricas repulsivas e atrativas entre as partículas em uma suspensão. A densidade de carga na superfície das partículas e o potencial zeta dependem do pH e da força iônica. A Figura 2 ilustra o potencial zeta das partículas de bauxita em função do pH.

Verifica-se que o ponto de carga zero das partículas ocorre no  $\text{pH} \cong 10,5$ . Neste valor de pH, o grau de aglomeração das partículas é máximo e acredita-se que as partículas de gibbsita comecem a sofrer o processo de desprotonação, modificando sua carga superficial. No intervalo de pH compreendido entre 7 e 11, o potencial zeta das partículas é próximo de zero. Espera-se que neste intervalo as partículas de caulinita, que apresentam cargas superficiais negativas, tenham uma interação atrativa com as partículas de gibbsita, que apresentam cargas superficiais positivas (Silva, 2011). Desta forma, neste intervalo de pH o grau de aglomeração das partículas é elevado. No pH 12, o potencial zeta das partículas é maior, o que é um indício de que as partículas de gibbsita e de caulinita apresentem cargas superficiais negativas. Assim, as forças de repulsão entre as partículas são maiores que as forças atrativas e, conseqüentemente, menor é o grau de aglomeração.

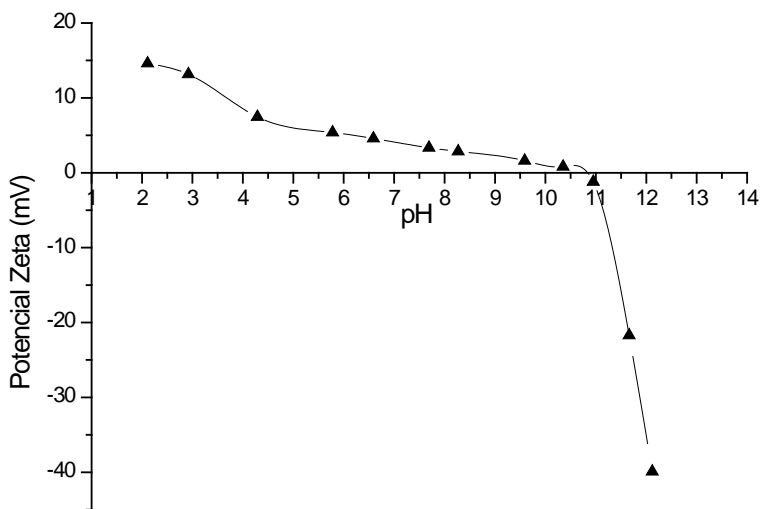


Figura 2 – Potencial zeta das partículas contidas na polpa de bauxita, em função do pH.

A Figura 3a ilustra a variação da viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento e do tempo. Verifica-se que as suspensões de bauxita caracterizaram-se pelo comportamento tixotrópico pois ocorreu o aumento da viscosidade aparente, quando a taxa de cisalhamento diminuiu, como também, a variação da viscosidade aparente com o tempo. Na Figura 3b, pode-se observar os valores de TR obtido para as polpas de bauxita preparadas de acordo com as condições descritas na Tabela I.

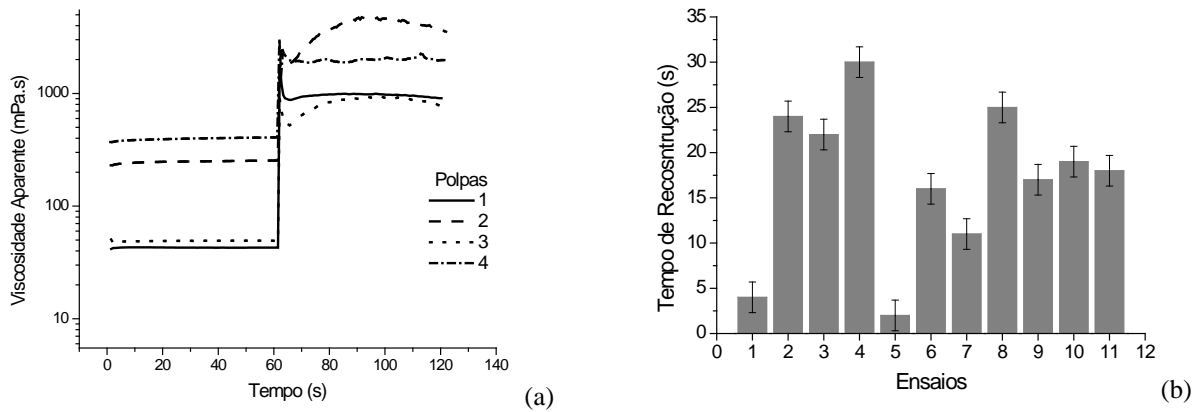


Figura 3 – Em (a) variação da viscosidade aparente das suspensões de bauxita, preparadas sob condições 1 a 4 (Tabela I), em função do tempo e da taxa de cisalhamento (programação degrau) e, em (b), valores do TR das partículas contidas nas polpas de bauxita

A Tabela II contém os parâmetros do modelo empírico que relaciona o tempo de reconstrução das estruturas tridimensionais (TR) com as variáveis de preparo da polpa de bauxita. As variáveis de preparo das polpas foram normalizadas e são independentes [+1,-1]. Desta forma, os valores dos parâmetros podem ser associados aos efeitos das variáveis. A estimação dos parâmetros foi realizada por meio de regressão linear (Box *et al.*, 1978). A significância do parâmetro foi obtida por meio do teste *t de student*. Quando a significância do parâmetro foi menor que 5%, o parâmetro e seu respectivo efeito foram removidos da Equação 1.

Tabela II – Valores dos parâmetros do modelo empírico que relaciona TR com as variáveis de preparo das polpas de bauxita.

Parâmetros	Tixotropia (Tempo de Reconstrução)
$a_0$	<b><math>17,091 \pm 0,302</math></b>
$a_{cs}$	<b><math>7,000 \pm 0,354</math></b>
$a_{DM}$	<b><math>-5,250 \pm 0,354</math></b>
$a_{pH}$	<b><math>-3,250 \pm 0,354</math></b>
$a_T$	$1,500 \pm 0,354$
$a_{CS,DM}$	$1,500 \pm 0,354$
$a_{CS,pH}$	$0,000 \pm 0,354$
$a_{CS,T}$	$-0,750 \pm 0,354$
$R^2$	0,993
CS – Concentração de Sólidos; DM – Diâmetro Médio das Partículas e T - Temperatura	

\* Efeitos significativos em negrito (intervalo de confiança: 95%)

A análise estatística dos parâmetros do modelo indica que os efeitos da concentração de sólidos, do diâmetro médio das partículas e do pH influenciam o TR. O efeito da temperatura não foi estatisticamente significativo, pois a variação do TR causada pela mudança de temperatura é menor do que o erro experimental. Verifica-se que a concentração de sólidos é a variável que possui maior influência direta no TR, já o diâmetro médio e o pH influenciam inversamente.

Com base no valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (Tabela II) e na comparação dos valores de TR calculados pelo modelo empírico e os obtidos experimentalmente (Figura 4), pode-se afirmar que o modelo obtido é adequado para estimar o TR e conseqüentemente, a intensidade do comportamento tixotrópico da polpa de bauxita.

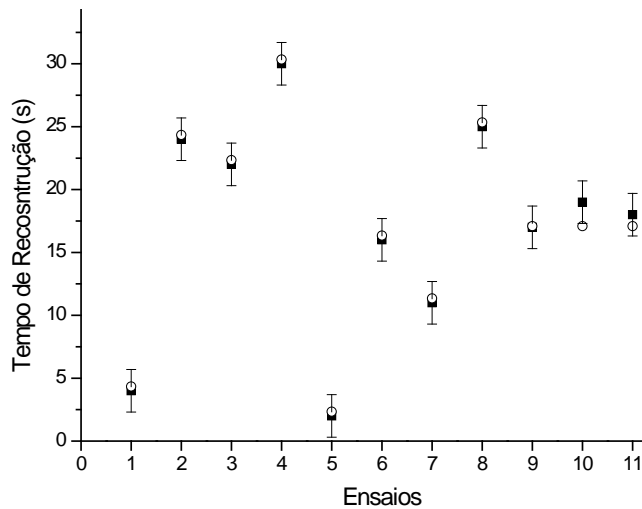


Figura 4 – Comparação entre os valores observados (■) e calculados (○) do TR na polpa de bauxita.

A análise dos valores do tempo de reconstrução das redes tridimensionais indica que o caráter tixotrópico das polpas aumenta com o aumento da concentração de sólidos (Figura 4). Isto ocorre devido à diminuição na distância interparticular com o aumento da quantidade de partículas e, conseqüentemente, a diminuição da espessura da camada de água existente nesses espaços. A aproximação das partículas intensifica a interação interparticulares, por meio das forças de van der Waals, proporcionando a formação de maior quantidade de aglomerados nas suspensões com 60% de sólidos (Nuntiya e Prasanphan, 2006 e He *et al.*, 2004).

A diminuição do diâmetro médio das partículas favoreceu o aumento do tempo de reconstrução das estruturas tridimensionais e a tensão de escoamento devido, ao aumento da área específica. Isto favoreceu o aumento da intensidade das forças de interação do tipo van der Waals entre as partículas. Assim, ocorre a formação de aglomerados, nos quais as partículas primárias estão unidas e aprisionam água em seu interior. Como esta água não está disponível no escoamento, a suspensão se comporta como se a fração volumétrica de sólidos fosse maior. Este mesmo comportamento foi observado por Sun *et al.* (2010), Nascimento e Sampaio (2009) e Alejo e Barrientos (2009).

O tempo de reconstrução das redes tridimensionais foi maior no pH 7 do que no pH 12. Isto ocorre devido ao pequeno valor de potencial zeta no pH 7 (+5 mV), o que indica que a densidade de cargas nas superfícies das partículas é pequena e conseqüentemente, o grau de aglomeração dessas partículas é elevado. Já no pH 12, o valor absoluto do potencial zeta é maior, aproximadamente -35 mV. Assim, neste pH a densidade de cargas na superfície é maior e conseqüentemente, as forças de repulsão entre as partículas são maiores, o que resulta em um grau de aglomeração menor.

#### 4. CONCLUSÕES

As suspensões de bauxita caracterizaram-se pelo comportamento tixotrópico. Este comportamento é adequado ao transporte das suspensões através do mineroduto, já que o comportamento dilatante pode acarretar a obstrução dos dutos durante o escoamento.

A análise estatística dos valores de TR das suspensões de bauxita indicou que o tempo de reconstrução das redes tridimensionais é influenciado diretamente pela concentração de sólidos e inversamente pelo diâmetro médio das partículas e pelo pH.

A condição de preparo da suspensão de bauxita que favoreceu menor caráter tixotrópico foi: 50% de sólidos, temperatura igual a 45°C, pH 12 e diâmetro médio das partículas igual a 17,9  $\mu\text{m}$  (30 min de moagem). Esta condição (suspensão 5 da Tabela I) é a mais adequada para o preparo da suspensão a ser bombeada e transportada através do mineroduto.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Tecnologia Mineral e a Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro pela estrutura laboratorial e orientação técnica e à CAPES pelo concessão da bolsa.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gandhi, R., Weston, M., Talavera, M., Brittes, G. P., Barbosa, E. Design and Operation of the World's First Long Distance Bauxite Slurry Pipeline. *Light Metals*. p.95-100, 2008.

Klein, B., Hallbom, D. J. Modifying the Rheology of Nickel Laterite Suspensions. *Minerals Engineering*, v. 15, p. 745-749, 2002.

Silva, F. A. N. G. Caracterização Estrutural e Estudo de Reatividade de Bauxita com Alto Teor de Sílica Reativa. Tese de Doutorado – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 123 p. 2011.

Silva, F. A. N. G., Santos, R. D., Sampaio, J. A., Garrido, F. M. S., Medeiros, M. E. Study on Ore Dressing and Characterization of Different Granulometric Fractions That Compound Bauxite from Pará/Brazil. *Light Metals*. p. 69-74, 2010.

Box, G. E. P., Hunter, W. G., Hunter, J. S., *Statistics for Experiments*. Wiley. New York, 1978.

Nascimento, C. R. E Sampaio, J. A. Estudo Reológico da Polpa de Bauxita. *Séries de Capacitação Institucional*. Rio de Janeiro, 2007

Nuntiya, A., Prasanphan, S. The rheological behavior of kaolin suspensions. *Chiang Mai J. Sci.*, v. 33(3), p. 271-281, 2006.

He, M., Wang, Y., Forssberg, E. Slurry Rheology in Wet Ultrafine Grinding of Industrial minerals: a Review. *Powder Technology*, v. 147, p. 94-112, 2004.

Alejo, B., Barrientos, A. Model for Yield Stress of Quartz Pulps and Copper Tailings. *International Journal of Mineral Processing*, v.93, p. 213-219, 2009.

Sun, L., Zhang, X., Tan, W., Zhu, M., Liu, R., Li, C. Rheology of Pyrite Slurry and Its Dispersant for the Biooxidation Process. *Hydrometallurgy*, v. 104, p. 178-185, 2010.