

OBTENÇÃO DA TENSÃO DE ESCOAMENTO DA POLPA DE BAUXITA POR MEIO DE MÉTODO INDIRETO

Carla N. Barbato^{1,2}, Sílvia C.A. França² & Márcio N. Souza¹

¹ Escola de Química/ Universidade Federal do Rio de Janeiro - Av. Horácio Macedo, 2030. Edifício do Centro de Tecnologia, Bloco E. Cidade Universitária. Cep: 21941-909. Rio de Janeiro - RJ

² Centro de Tecnologia Mineral- Av. Pedro Calmon, 900. Cidade Universitária. Cep:21941-908. Rio de Janeiro - RJ E-mail: cbarbato@cetem.gov.br

RESUMO

Tensão de escoamento consiste no valor mínimo da tensão de cisalhamento e corresponde a primeira evidência do escoamento. O conhecimento do valor da tensão de escoamento é muito importante no manuseio, armazenamento, processamento e transporte de minerais na indústria. Por exemplo, no transporte de polpas através de dutos, é importante obter informações sobre a tensão de escoamento para realizar o projeto das bombas e de dutos. A tensão de escoamento pode ser obtida indiretamente por meio do ajuste dos dados experimentais de taxa e tensão de cisalhamento, com auxílio de equações constitutivas que relacionam estas variáveis. Neste trabalho, com a finalidade de obter a tensão de escoamento da polpa de bauxita com 50 e 60% de sólidos utilizou-se o método indireto. Para ajustar os dados experimentais de taxa e tensão de cisalhamento das polpas de bauxita utilizou-se os modelos de Bingham, Casson e Herschel-Bulkley. Verificou-se que o modelo que melhor ajusta os dados experimentais é o de Casson.

PALAVRAS-CHAVE: Tensão de escoamento, Casson, Bingham, bauxita.

ABSTRACT

The yield stress is the minimum shear stress and corresponding to the first evidence of flow. The knowledge of the yield stress is very important to handling, storage, processing and transport of concentrated suspensions in the mineral industry. For example, in slurry pipeline transport, knowledge of the yield stress value is essential for pump and pipeline design. The yield stress can be determined by indirect method that experimental shear rate-shear stress data is adjusted by constitutive equations. The objective of this work is obtaining the yield stress of bauxite slurry with 50 and 60% (w/w) by indirect method. The models used to fit the experimental shear rate-shear stress data were Bingham, Casson and Herschel-Bulkley, with the best results presented by Casson model.

KEY WORDS: yield stress, Casson, Bingham, bauxite

1. INTRODUÇÃO

A rocha bauxita compõe-se de uma mistura impura de minerais de alumínio, sendo os mais importantes a gibbsita ($(Al(OH)_3)$), o diásporo ($(AlO(OH))$) e a boehmita ($(AlO(OH))$). Sua principal utilização é na produção de alumínio (Sampaio e outros, 2005). Em 2007, as reservas mundiais de bauxita foram estimadas em aproximadamente 34 bilhões de toneladas. O Brasil detém 10,6% desse total (Mártires, 2008).

No estado do Pará está em operação o primeiro mineroduto de polpa de bauxita do mundo e tem o propósito de transportar a polpa de minério de alumínio da usina de beneficiamento até a usina de produção de alumina. As propriedades reológicas, como a viscosidade, a tensão de escoamento e tixotropia tem impactos diretos nos aspectos técnicos e econômicos do bombeamento de fluidos.

No transporte de polpas por meio de dutos, é importante obter informações sobre a tensão de escoamento para realizar o projeto das bombas e de dutos. Além disso, elevados valores de tensão de escoamento podem ser obtidos para diminuir o processo de sedimentação das partículas por longos períodos.

Tensão de escoamento consiste no mínimo valor da tensão de cisalhamento e é a primeira evidência de escoamento, ou seja, é o valor da tensão de cisalhamento quando o gradiente de velocidade tende a zero (Liddell e Bogger, 1995, Stokes e Telford, 2004). Normalmente, determina-se a tensão de escoamento em suspensões em que há interações interparticulares, resultantes da atração entre as partículas. As partículas agregam-se formando flocos e estruturas tridimensionais. (Dzuy e Boger, 1983).

Os valores de tensão de escoamento podem ser obtidos diretamente ou indiretamente. A medida direta pode ser obtida por meio da tensão de cisalhamento do fluido, quando este começa a escoar. Estes experimentos podem ser realizados com o controle da tensão de cisalhamento ou da taxa de cisalhamento. Em ambos os experimentos, a tensão de cisalhamento corresponde à primeira evidência do fluido plástico a fluir e é interpretada como a tensão de escoamento.

As medidas indiretas para estimar a tensão de escoamento são baseadas na extrapolação dos valores da tensão de cisalhamento contidos no reograma ($\tau \times \dot{\gamma}$) até o valor em que a taxa de cisalhamento tende a zero. Na prática, este tipo de medida indireta, realizada em viscosímetros convencionais, não é simples, devido à ausência de dados em baixas taxas de cisalhamento, pois ocorre a sedimentação e o deslizamento das partículas na parede do recipiente. Também pode-se realizar o ajuste dos dados experimentais de taxa e tensão de cisalhamento por meio de equações constitutivas desenvolvidas para fluidos plásticos, como o modelo de Bingham, Casson e Hershel-Bulkley (Kelessidis e Maglione, 2008).

O modelo de Bingham relaciona linearmente taxa ($\dot{\gamma}$) e tensão de cisalhamento (τ), como pode ser observado na Equação 1.

$$\tau = \tau_B + \mu_p \dot{\gamma} \quad (1)$$

Sendo τ_B e μ_p constantes.

A tensão de escoamento de suspensões que possuem um comportamento plástico não-linear pode ser expressa, por exemplo, pelas equações de Herschel-Bulkley e Casson, descritas pelas Equações 2 e 3, respectivamente.

$$\tau = \tau_{HB} + K \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_c} + \sqrt{\mu_c} \dot{\gamma} \quad (3)$$

Sendo τ_c , τ_{HB} , μ_c , K , n constantes.

Dentro do contexto acima, o presente trabalho tem como finalidade obter a tensão de escoamento de polpas de bauxita utilizando o método indireto e realizar os ajustes dos dados experimentais de taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento por meio de equações constitutivas como, por exemplo, a de Casson, Hershel-Bulkley e Bingham.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A bauxita utilizada neste trabalho é proveniente do Nordeste do Pará e é constituída, basicamente, pelos minerais gibbsita e caulinita (Silva e outros, 2009).

Foram preparadas quatro polpas de bauxita variando-se a concentração de sólidos e a distribuição granulométrica (Tabela 1), para a realização dos estudos reológicos. As distribuições granulométrica foram ob-

tidos por meio de diferentes tempos de moagem. Os valores de concentração de sólidos e a distribuição de tamanho de partícula utilizados na preparação das polpas foram determinados com base nas condições industriais de transporte no mineroduto de bauxita, localizado no estado do Pará. As condições industriais são: concentração de sólidos na polpa - 47 a 52% e distribuição granulométrica - 6% retido em 0,208 mm e 40 a 47% passante em 0,043 mm (Gandhi e outros, 2008).

Tabela 1. Distribuição granulométrica das polpas de bauxita

Abertura da Peneira (mm)	Distribuição Granulométrica A	Distribuição Granulométrica B
	Passante (%)	Passante (%)
0,589	100	100
0,417	98,37	100
0,295	91,84	100
0,208	72,32	95,43
0,147	61,95	88,36
0,104	52,88	76,49
0,074	46,06	65,98
0,053	40,52	58,20
0,043	37,50	53,73
0,037	34,44	49,29

As condições de preparo das polpas de bauxita podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2. Condições de preparo das polpas de bauxita

Polpas	Concentração de Sólidos	Distribuição Granulométrica
1	50	A
2	50	B
3	60	A
4	60	B

As medidas reológicas foram obtidas em reômetro fabricado pela Haake e utilizou-se a geometria cilindro coaxial. Para cada polpa de bauxita obteve-se, inicialmente, os dados de tensão de cisalhamento a uma taxa de cisalhamento constante. As taxas de cisalhamento utilizadas foram de 1, 3, 5, 10, 15, 25, 50 e 75 s⁻¹. Os dados experimentais de tensão e taxa de cisalhamento foram utilizados para ajuste dos modelos de Bingham, Casson e Hershel-Bulkley.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 1, 2, 3 e 4 ilustram os resultados dos ajustes dos modelos de Casson e de Bingham para os dados experimentais de tensão e taxa de cisalhamento para as polpas de bauxita estudadas. Não foi possível o ajuste dos dados experimentais utilizando o modelo de Hershel-Bulkley, pois os parâmetros encontrados, para este modelo, não foram estatisticamente significativos.

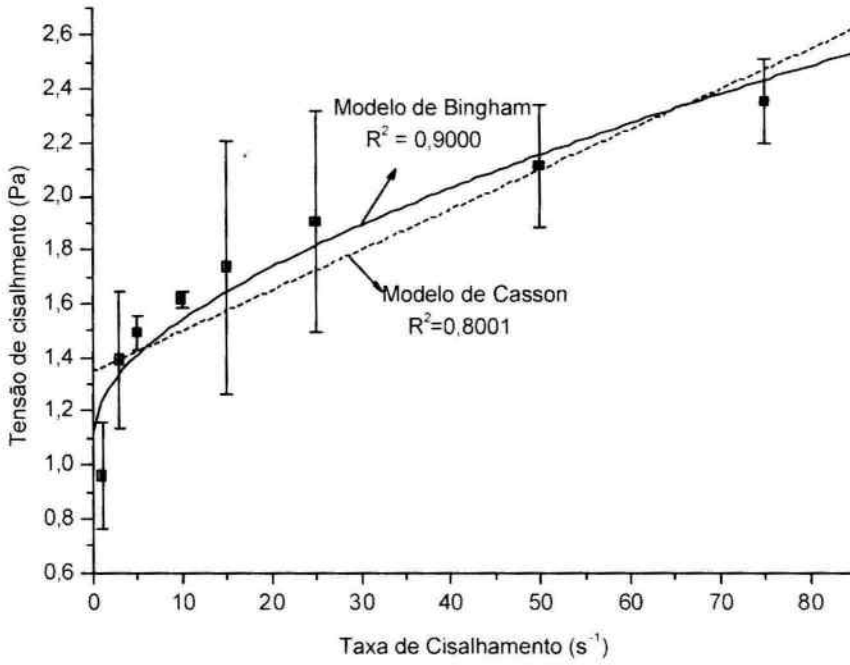


Figura 1. Ajuste dos modelos de Casson e Bingham para os dados experimentais de tensão e taxa de cisalhamento da polpa 1

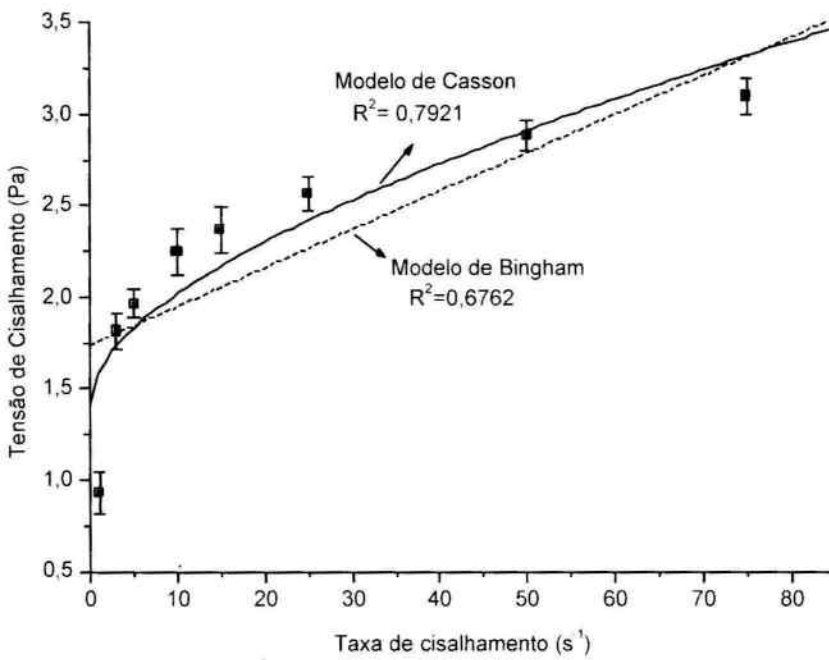


Figura 2. Ajuste dos modelos de Casson e Bingham para os dados experimentais de tensão e taxa de cisalhamento da polpa 2

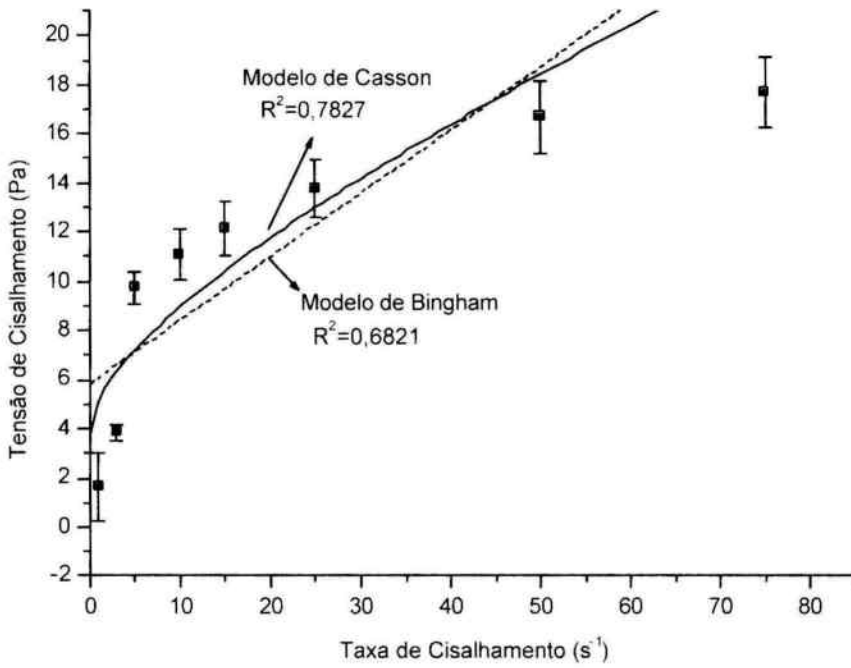


Figura 3. Ajuste dos modelos de Casson e Bingham para os dados experimentais de tensão e taxa de cisalhamento da polpa 3

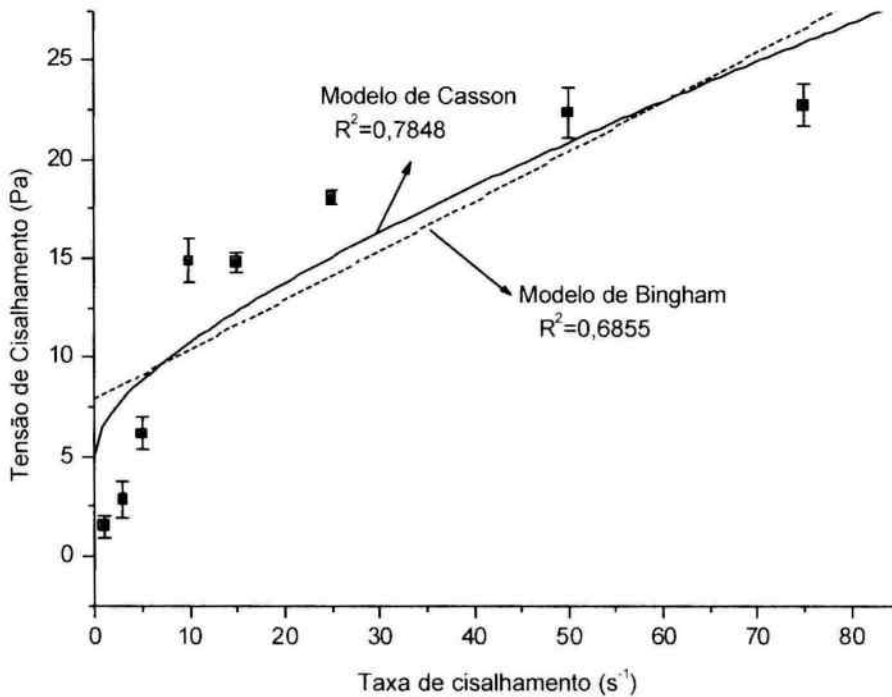


Figura 4. Ajuste dos modelos de Casson e Bingham para os dados experimentais de tensão e taxa de cisalhamento da polpa 4

Os modelos de Bingham e Casson apresentaram boa previsão em taxas de cisalhamento moderadas (10 a 75 s^{-1}), porém não obteve-se o mesmo resultado em baixas taxas ($1, 3$ e 5 s^{-1}) e por este motivo os coeficientes de correlação (R^2) encontrados para os modelos não foram muito satisfatórios, não estando próximos de 1. Para melhorar o valor de R^2 , sugere-se dividir o intervalo da taxa de cisalhamento em duas regiões: baixas e moderadas, para em seguida realizar o ajuste dos dados experimentais utilizando os dois modelos.

Os resultados obtidos para a polpa 1 mostram que o erro experimental foi elevado, provavelmente, devido ao processo de sedimentação das partículas, já que esta polpa em relação a outras apresenta a menor concentração de sólidos (50%) e maior quantidade de partículas grossas (100% passante em 0,589 mm - distribuição granulométrica A). Desta forma, esta polpa apresenta a maior velocidade de sedimentação, pois esta sofre menor influência do efeito populacional, ou seja, quando há poucas partículas na polpa estas descrevem uma trajetória descendente livre e sedimentam rapidamente.

A Tabela 3 contém os valores de tensão de escoamento estimados pelos modelos de Bingham e de Casson. Verifica-se que os valores de tensão de escoamento são maiores quando calculados pelo modelo de Bingham. Este mesmo comportamento foi observado no trabalho de Dzuy e Boger (1983), para uma polpa de dióxido de titânio com 37,3% de sólidos. De acordo com a literatura (Dzuy e Boger (1983), Kelessidis e Maglione, 2008) o modelo de Bingham não é recomendado para calcular a tensão de escoamento de polpas concentradas, devido à superestimação da tensão de escoamento quando comparado com outros modelos. Essa observação é corroborada pelos resultados experimentais obtidos nesse trabalho, para valores de baixas taxas de cisalhamento, como pode ser observado nos gráficos das Figuras 1 a 4.

O modelo de Casson é preferencialmente aplicável ao modelo de Bingham para calcular a tensão de escoamento, pois os valores do coeficiente de correlação, para todas as polpas de bauxita, foram maiores quando utilizou-se o modelo de Casson. Nota-se também que o perfil dos dados experimentais de taxa e tensão de escoamento é não-linear, além de o modelo de Bingham superestimar o valor da tensão de escoamento para polpas concentradas, como mencionado anteriormente.

Tabela 3 – Tensão de escoamento calculada pelos modelos de Casson e de Bingham.

Polpas	Tensão de Escoamento Calculada pelo Modelo de Casson (Pa)	Tensão de Escoamento Calculada pelo Modelo de Bingham (Pa)
1 (50% de sólidos, 100% passante em 0,589 mm)	1,10	1,35
2 (50% de sólidos, 100% passante em 0,295 mm)	1,39	1,74
3 (60% de sólidos, 100% passante em 0,589 mm)	3,72	5,83
4 (60% de sólidos, 100% passante em 0,295 mm)	4,97	7,85

Observa-se na Tabela 3 que, para as polpas com a mesma distribuição granulométrica, a tensão de escoamento é maior quanto maior é a concentração de sólidos. Isto ocorre porque há diminuição da camada de lubrificante (água) entre as partículas com o aumento da concentração de sólidos, o que favorece as interações entre elas e, conseqüentemente, a formação de aglomerados. Desta forma, maior é a força de cisalhamento a ser exercida entre as partículas para que os aglomerados sejam destruídos e para que o fluido comece a escoar (He e outros, 2006).

Quando a concentração de sólidos é fixada e varia-se a distribuição granulométrica, verifica-se o aumento da tensão de escoamento devido ao aumento da quantidade de partículas finas na polpa. Este fato pode ser explicado pela maior área superficial das partículas finas que favorece as interações de *van der Waals* entre elas, inclusive com maior probabilidade de formar aglomerados.

4. CONCLUSÕES

Os ajustes dos modelos de Casson e de Bingham não foram satisfatórios em baixas taxas de cisalhamento (1 a 5 s^{-1}), por este motivo sugere-se a divisão do intervalo da taxa de cisalhamento em duas regiões: baixas e moderadas, para em seguida realizar a estimação dos parâmetros e ajuste dos modelos.

O modelo de Bingham não é recomendado para a obtenção do valor da tensão de escoamento para polpas concentradas devido a superestimação desta variável.

O modelo de Casson (não-linear) é preferencialmente aplicável ao modelo de Bingham (linear) para calcular a tensão de escoamento, já que o primeiro prevê melhor a não linearidade dos dados experimentais, apresentando, conseqüentemente, melhores coeficientes de correlação.

O aumento da tensão de escoamento é diretamente proporcional a concentração de sólidos e a quantidade de partículas finas na polpa, pois ambas as variáveis contribuem para a formação de aglomerados das partículas e desta forma maior será a força de cisalhamento para quebrar os aglomerados e fazer com que o fluido comece a escoar.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dzuy, N.Q. & Boger, D. V. Yield Stress Measurement for Concentrated Suspensions. *Journal of Rheology*. 27. p. 321-349. 1983.
- 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.
- He, M., Wang, Y. & Forssberg, E. Parameter Studies on the Rheology of Limestone Slurries. *International Journal of Mineral Processing*. 78. p.63-77. 2006.
- Kelessidis, V.C. & Maglione, R. Yield Stress of Water-Bentonite Dispersions. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 318. p.217-226. 2008.
- Liddell, P. V. & Boger D. V. Yield Stress Measurements with the Vane. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 63. p. 235-261.1996.
- Martires, R. A.C. Alumínio. In: *Anuário Mineral Brasileiro, Para, Brasil, DNPM, 2008*.
- Sampaio, J. A., Andrade, M. C.e Dutra, A. J. B. Bauxita. In: *Rochas e Minerais Industriais*. Luz, A. B., Lins, F. F. (Editor), Rio de Janeiro, p.279-304. 2005.
- Silva, F. A. N. G., Medeiros, M. E., Sampaio, J. A., Santos, R. D., Carneiro, M. C., Costa, L. S., Garrido, F. M. S. Technological Characterization of Bauxite from Pará-Brazil. *Light Metals*. p. 139-144. 2009.
- Stokes, J. R. e Telford, J. H. Measuring the Yield Behaviour of Structured Fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*.124.p .137-146. 2004.