

Estudo Reológico da Polpa de Bauxita

Christine Rabello Nascimento

Bolsista PCI, Engenheira Química, D. Sc, COPM - CETEM

João Alves Sampaio

Coordenador, Engenheiro de Minas, D. Sc., COPM - CETEM

Resumo

Este trabalho visa apresentar os principais resultados e conclusões obtidos com o estudo do comportamento reológico da polpa de bauxita, bem como as diretrizes para a continuidade da pesquisa. A relevância deste trabalho consiste em consolidar no CETEM o domínio do conhecimento (*Know-How*) sobre a reologia de polpa, tornando este Centro apto a sugerir melhorias no desempenho de processos nos quais as propriedades reológicas possuam impacto significativo como, particularmente, no transporte de polpas por minerodutos. As propriedades reológicas observadas foram a viscosidade, a tensão limite de escoamento e a tixotropia, mediante a execução de testes em reômetro rotacional com rotor cilíndrico e tipo “vane”. As variáveis examinadas foram a concentração, o aumento do teor de finos, a temperatura e o pH. Verificou-se um aumento pronunciado da viscosidade e do caráter reopéxico com o aumento da concentração e a queda da viscosidade com o aumento do teor de finos e da temperatura.

1. Introdução

O deslocamento em dutos é a forma mais econômica de se transportar continuamente grandes quantidades de matérias-primas, tais como petróleo e minérios (CHANG *et al*, 1999; HUYNH *et al*, 2000). Na otimização do processo de transporte em minerodutos, são levados em conta três fatores principais: a concentração do minério, a vazão e o consumo de energia na operação. Enquanto que os dois primeiros fatores devem ser maximizados, o gasto com energia é o fator restritivo do processo, devendo ser reduzido. Propriedades reológicas, como a viscosidade, a tensão limite de escoamento e tixotropia, têm impacto direto nos aspectos técnicos e econômicos do bombeamento de fluidos.

A viscosidade (η) 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. A viscosidade de uma suspensão é função de fatores tais como a sua composição (distribuição do tamanho, carga superficial e formato das partículas); a concentração; a temperatura; o pH e a 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. Muitas suspensões, particularmente àquelas com alto grau de anisotropia de seus componentes, apresentam variação da viscosidade com o tempo quando são submetidas a taxas de cisalhamento constantes, sendo que a

viscosidade tenderá a um valor constante após um certo período. Este fenômeno é conhecido como tixotropia, quando ocorrer queda da viscosidade com o tempo, ou reopexia, quando for observado o aumento da viscosidade com o tempo [Figura 1]. Existem casos em que a literatura usa erroneamente o termo “tixotrópico” no lugar de “pseudoplástico” (BARNES, 1997) na classificação dos materiais. A pseudoplasticidade é uma característica altamente vantajosa para diversos processos, inclusive para o bombeamento, e significa a queda da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, contudo, sem ocorrer variação com o tempo. Já os materiais tixotrópicos, que também são pseudoplásticos, são influenciados pela história de pré-cisalhamento o que, dependendo do processo, não é uma característica desejável.

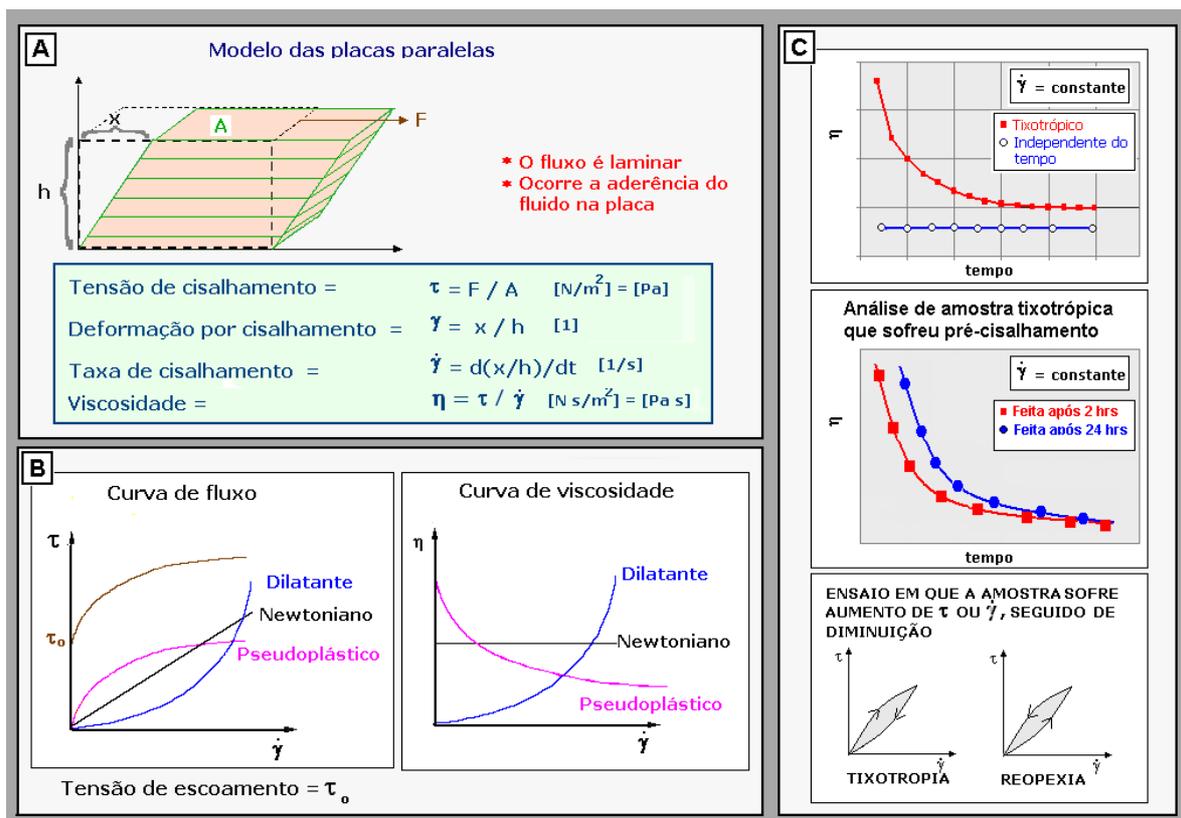


Figura 1. Definições básicas em reologia (A), principais tipos de fluidos (B) e seqüência de análises que evidenciam o fenômeno da tixotropia (C).

Existem materiais que só se comportam como fluidos quando são submetidos a um determinado valor de tensão de cisalhamento (τ) igual ou superior a um valor de tensão crítica (τ_0), conhecida como tensão limite de escoamento ou, simplesmente, tensão de escoamento (*Yield stress*). Abaixo deste valor de tensão, considera-se que o material possui viscosidade infinita, ou seja, o material se comporta como um sólido. Vários materiais apresentam este comportamento, tais como suspensões concentradas, géis poliméricos e cremes. Esta característica será desejável se o material (produto) precisar ter uma certa consistência quando estiver em repouso ou, ainda, se for necessário evitar ou atrasar a separação de fases entre os componentes de uma

suspensão. Entretanto, o bombeamento de materiais que possuam tensão de escoamento requer uma atenção especial, particularmente na inicialização do processo. Quando a tensão de cisalhamento na parede do duto (τ_w), que corresponde ao máximo valor de tensão aplicável num tubo a uma dada pressão P [Equação 1], for inferior a τ_0 , o material não fluirá (GILL & RUSSEL ,1954):

$$\tau_w = R P / 2L , \quad [1]$$

onde R e L são, respectivamente, o raio e o comprimento do tubo e P é a pressão.

Diversos modelos de viscosímetros e reômetros podem ser usados na determinação das propriedades reológicas, sendo necessário avaliar as limitações e vantagens na escolha da geometria adequada. A metodologia e os instrumentos empregados na análise reológica de suspensões devem ser criteriosamente escolhidos, pois existem vários fatores que podem acarretar em erro na interpretação dos resultados. A sedimentação das partículas durante o teste consiste numa dificuldade experimental quando se usa o reômetro do tipo cilindros coaxiais na análise de suspensões (HE *et al*, 2004). A utilização de rotores com o formato de hélices (tipo *vane*) pode servir como alternativa para eliminar o efeito da sedimentação durante o ensaio (MARQUEZ *et al*, 2006).

2. Materiais e Métodos

A amostra de polpa de bauxita originária do estado do Pará (norte do Brasil) foi homogeneizada por agitação mecânica e fracionada em quantidades menores. A concentração da polpa original 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. Dependendo do experimento, a concentração ou a distribuição granulométrica foi modificada pela adição do material seco da polpa original ou da fração mais fina (- 37 μm).

2.1 - Ensaio reológicos

Foi utilizado um reômetro HAAKE, modelo RheoStress 1. Os rotores utilizados foram o Z34 DIN Ti (cilindro) e 2 blade ref. 222-1599 (*vane*). As programações dos testes estão expostas na Figura 2.

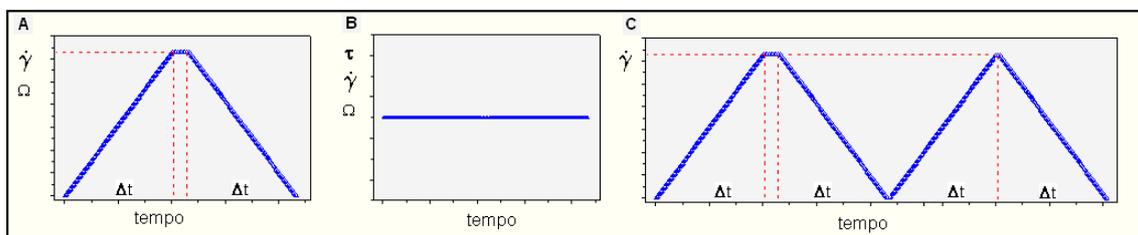


Figura 2. Programação dos testes: (A) rampa de aumento e diminuição da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) ou velocidade de rotação (Ω); (B) Manutenção da tensão de cisalhamento (τ), da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) ou da velocidade de rotação (Ω); (C) rampa dupla de aumento e diminuição da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$).

3. Resultados e Discussão

Inicialmente, foi feita uma avaliação da influência do tempo de rampa (Δt , Fig.2 A) no comportamento reológico da polpa de bauxita original (50% p/p), com a utilização do rotor cilíndrico. Observou-se que Δt influencia nas curvas de fluxo e de viscosidade [Fig. 3 A, B e C], cujo perfil pode inclusive sofrer modificação. Esta característica pode ser atribuída a tixotropia do material, ou seja, a dependência da estrutura à condição (tempo) de pré-cisalhamento. Uma rampa curta implica num nível de destruição menor dos agregados, o que acarreta em valores maiores de viscosidade [Fig. 3C]. Se a sedimentação não fosse rápida, a programação do teste deveria ser feita com $\dot{\gamma}$ variando em degraus, visto que cada ponto $\tau(\dot{\gamma})$ seria obtido após um intervalo de tempo, necessário para a estrutura atingir o equilíbrio. Assim, quando se usa a programação em rampa, a comparação direta entre as amostras só pode ser feita se o mesmo procedimento de análise for seguido.

A avaliação da influência da concentração da polpa, da adição de finos e da temperatura foi feita mediante a programação em rampa [Fig. 1A], com Δt de 100 s, $\dot{\gamma}$ máxima de 200 s⁻¹ e rotor cilíndrico. Observa-se o aumento da tensão de cisalhamento (τ) e da viscosidade (η) com o aumento da concentração [Fig.3 E e G], sendo que este aumento é bem maior quando o aumento da concentração se dá pelo acréscimo de finos. É esperado que o material mais fino, em particular as partículas coloidais, promovam um aumento maior da viscosidade, tendo em vista a sua grande área superficial ampliar o efeito das interações no meio. Por outro lado, sabe-se que o alargamento da distribuição de tamanhos de partículas tem o efeito de redução da viscosidade (HE *et al*, 2004), o que foi observado no caso em que o material fino é adicionado à polpa, mantendo-se a concentração constante [Fig. 3 H]. Observa-se no gráfico da Figura 3E uma queda brusca da resistência ao escoamento entre 3 - 7 segundos de teste, quando a tensão de cisalhamento atinge a faixa de 5 - 9 Pa, dependendo da concentração. Estes valores de tensão não se enquadram rigorosamente na conceituação adotada para tensão de escoamento (τ_0), visto que já houve deformação do material em tensões mais baixas. Conforme a concentração aumenta, a polpa passa a ter um caráter reopético [Fig. 3 F]. Observa-se uma ligeira queda da viscosidade da polpa (50% p/p) conforme temperatura do meio é aumentada, o que é devido, provavelmente, a queda da viscosidade da água [Fig. 3 I].

Quando a curva de fluxo da polpa original (50% p/p) é obtida usando taxas de cisalhamento mais elevadas (rampa com Δt de 100 s, $\dot{\gamma}$ máxima de 1000 s⁻¹ e rotor cilíndrico), observa-se que praticamente não há histerese acima de 700 s⁻¹ e ocorre uma mudança do comportamento pseudoplástico para dilatante (detalhe da Figura 3 J). Contudo, ainda não está descartada a hipótese deste efeito ser, na verdade, derivado da mudança do regime laminar para turbulento, havendo a necessidade de esclarecer melhor este resultado.

A utilização do rotor *vane* na investigação da tixotropia da amostra de polpa (50% p/p) foi feita mediante testes com velocidades de rotação constantes ao longo de tempo [Fig. 3 D]. Velocidades baixas resultaram em valores de viscosidade inicial mais elevados e, na medida em que a velocidade aumenta, o material mudou de tixotrópico para reopético. Com a utilização de velocidades muito baixas (5 e 15 RPM), percebe-se a ocorrência de oscilações 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.

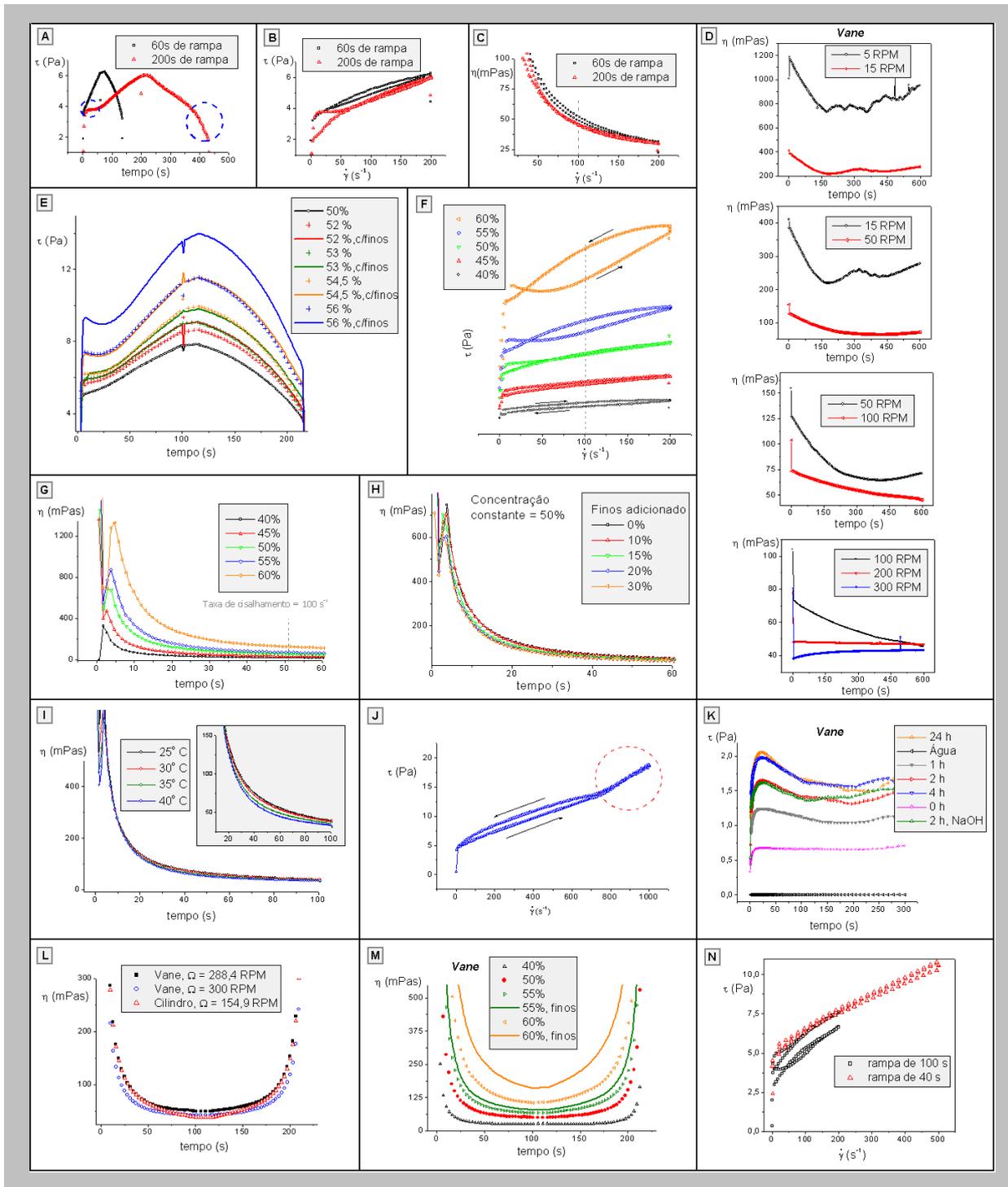


Figura 3. Curvas referentes ao comportamento reológico da polpa de bauxita, observado em diferentes condições de ensaio.

A grande desvantagem do uso do rotor *vane* consiste na não uniformidade do cisalhamento aplicado ao longo da amostra e, por conseguinte, a não existência de uma taxa de cisalhamento definida. Isto dificulta a comparação entre os ensaios feitos com outras geometrias de rotor como, por exemplo, os cilíndricos. A fim de superar esta dificuldade e estabelecer uma condição de análise capaz de oferecer resultados comparáveis aos obtidos anteriormente, foi estabelecida uma condição de análise na qual a curva de viscosidade da amostra de polpa original (50% p/p) fosse similar a curva obtida utilizando o rotor cilíndrico [Fig. 3L]. Esta condição consiste numa programação em rampa [Fig. 1A], com Δt de 100 s e Ω máxima de 288,4 RPM, pois foi a que resultou em valores de viscosidade mais próximos aos obtidos anteriormente com rotor cilíndrico (rampa com Δt de 100 s, $\dot{\gamma}$ máxima de 200 s⁻¹). Com essa programação, pôde-se verificar que o efeito da concentração, com e sem a adição de finos, foi igual ao observado quando o rotor cilíndrico foi usado [Fig. 3 M], ou seja, ocorreu o aumento da viscosidade com o aumento da concentração e este aumento foi maior quando o material mais fino foi adicionado. Este resultado serviu para comprovar que os efeitos de sedimentação e estratificação não comprometeram os resultados dos testes que foram feitos com o rotor cilíndrico.

A Figura 3K mostra a variação da tensão com o tempo de sedimentação da amostra de polpa (50% p/p), utilizando o rotor *vane*. Este é um teste típico para determinação de τ_0 , consistindo na manutenção da taxa de cisalhamento constante [Fig. 1B] num valor muito baixo, para que se possa detectar a transição sólido/líquido como o ponto máximo de tensão. Contudo, neste trabalho, esta metodologia foi aplicada com o objetivo de se acompanhar o aumento da coesão entre as partículas decorrente do processo de sedimentação. Observa-se que após 4 horas de sedimentação a coesão entre as partículas atingiu praticamente o máximo e que o aumento do pH (adição de NaOH) não influenciou na coesão.

Com a execução de uma programação de teste tipo rampa dupla [Fig. 1 C] foi possível verificar que com a utilização de um tempo de rampa mais curto é possível minimizar o efeito da sedimentação durante a análise feita com rotor cilíndrico. Observa-se que com um tempo de rampa de 40 s [Fig. 3 N] ocorreu praticamente a sobreposição da curva de fluxo ao passo que com um tempo maior (100 s) a parte da curva relativa a 2ª rampa ocorreu num intervalo de tensões inferior. Isto indica que num tempo de análise mais longo, com a formação de um gradiente de concentração dentro do copo, a parte da suspensão medida pelo reômetro estava menos concentrada, o que resultou em valores de tensão de cisalhamento inferiores aos da amostra homogênea.

Foi feito um estudo sobre a influência da variação do pH da polpa (50% p/p) utilizando a programação de rampa dupla [Fig. 1 C]. Não foi observada nenhuma alteração significativa das curvas de fluxo dentro da faixa de pH investigada (5,45 – 9,45). Os testes foram realizados imediatamente após a estabilização do pH e após 1h e 5 dias, em virtude da observação de que existe uma tendência da amostra retornar ao pH neutro com o tempo.

4. Atividades Futuras

A investigação detalhada sobre a química de superfície da bauxita fornecerá elementos para a escolha de aditivos capazes de promover uma melhor dispersão das partículas da polpa e, por conseguinte, diminuir a viscosidade do meio. Aditivos poliméricos, capazes de atuar como redutores de perda de carga em regime turbulento, também serão investigados.

5. Conclusões

A polpa tem característica pseudoplástica, com grau de tixotropia fortemente dependente da concentração.

O aumento da concentração causa aumento da viscosidade, sendo que este aumento é mais pronunciado quando acompanhado por um aumento na proporção de finos.

O aumento da temperatura e da proporção de finos leva a queda da viscosidade, para uma dada concentração.

A modificação do pH não promoveu alteração nas propriedades reológicas da amostra.

6. Agradecimentos

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

7. Referências Bibliográficas

- BARNES, H. B., Thixotropy - a review. **J. Non-Newtonian Fluid Mech.**, v.70, p. 1-33, 1997.
- CHANG, C.; NGUYEN, Q. D.; RONNINGSEN, H.P., Isothermal start-up of pipeline transporting waxy crude oil. **J. Non-Newtonian Fluid Mech.**, v. 87, p. 127–154, 1999.
- GILL, F.; RUSSEL, R. J., Pumpability of Residual Fuel Oils. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 46, nº 6, p. 1264 – 1278, 1954.
- 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.
- HUYNH, L.; JENKINS, P.; RALSTON, J., Modification of the rheological properties of concentrated slurries by control of mineral–solution interfacial chemistry. **Int. J. Miner. Process.**, v. 59, p. 305–325, 2000.
- 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.