

# **Reologia aplicada ao desaguamento de polpas minerais para a produção de pastas**

## **Rheology applied to dewatering of mineral pulps to paste production**

**Bruna Camara Trampus**

Bolsista Capacitação Institucional, Eng<sup>a</sup>. Química, M.Sc.

**Sílvia Cristina Alves França**

Supervisora, Eng<sup>a</sup>. Química, D.Sc.

### **Resumo**

A indústria mineral gera grandes quantidades de rejeito sólido, e devido aos diversos acidentes que vêm ocorrendo com as barragens convencionais, estudos buscam o desaguamento dos rejeitos antes de sua deposição. Neste trabalho foram estudadas as propriedades da lama vermelha e de um rejeito da flotação de minério sulfetado de níquel, a fim de determinar o comportamento reológico e estabilidade para disposição em barragens. Para tanto, os rejeitos foram submetidos a ensaios de floculação/sedimentação, e o sedimento foi analisado a partir de ensaios reológicos com a geometria Vane, e *slump test*, para obtenção de informações sobre tensão limite de escoamento e percentagem de abatimento do rejeito adensado, respectivamente. Os resultados mostram uma forte influência da concentração inicial de sólidos e do tipo de polímero floculante, no estado de agregação das partículas. O processo de adensamento estudado mostrou-se eficiente na agregação/sedimentação das partículas sólidas, permitindo remoção e reuso da água contida na polpa, e a produção de sedimentos que atingem uma tensão limite de escoamento estática de até 1400 Pa, muito superior à especificada para pastas minerais.

**Palavras chave:** reologia; pasta mineral; deposição de rejeito; tensão limite de escoamento; reuso de água.

### **Abstract**

The mineral industry generates large amounts of tailings, and because of many accidents that have occurred with conventional dams, studies have focused on tailings dewatering before their deposition. This study evaluates the properties of red mud and nickel tailings, to determine their rheological behavior and stability for disposal in dams. For this, the tailings were submitted to flocculation/sedimentation tests, and the sediment was analyzed from rheological tests with the vane technique and slump test, in order to obtain information about yield stress and slump height, respectively. The results showed a strong influence of the initial solids concentration and the flocculant polymers type, on the particle aggregation. The densification processes studied were efficient on the particles aggregation/sedimentation, allowing water recycling contained in the slurry, and the production of sediment with static yield stress up to 1400 Pa, much higher than specified for mineral paste.

**Key words:** rheology; mineral paste; tailing disposal; yield stress; water recycling.

## 1. Introdução

A disposição dos rejeitos minerais como pastas, é uma alternativa promissora em substituição a convencional, polpas, pois aumenta a estabilidade das barragens e permite o reaproveitamento da água de processo. A polpa é caracterizada por ser um fluido newtoniano, heterogêneo, com baixa concentração de sólidos, e bombeado em regime turbulento, por bombas centrífugas, para as barragens, onde ocorre a segregação e sedimentação das partículas, gerando elevada quantidade de água sobrenadante. Já as pastas minerais são definidas como um material adensado e homogêneo, com baixo ou nenhum nível de água livre, que escoam em fluxo laminar, por meio de bombas de deslocamento positivo, sem segregação granulométrica das partículas, e quando disposto de forma suave, não apresentam drenagem significativa de água e mínima permeabilidade (BOGER, 2013).

Inúmeros fatores físico-químicos podem influenciar a floculação e o desaguamento de suspensões minerais, como, densidade de cargas, pH, concentração de sólidos, distribuição granulométrica e dosagem e estrutura do polímero floculante. Conforme as polpas são adensadas para produção das pastas, as suspensões minerais passam a se comportar como fluido não newtoniano, com tensão limite de escoamento ( $\tau_0$ ), que é a tensão mínima necessária para que ocorra a deformação irreversível do material. E, tendo as pastas a característica de apresentar  $\tau_0$  mínima de 200 Pa, esta variável denota a transição entre o comportamento de polpas e pastas. Assim sendo, o monitoramento desse parâmetro é fundamental para o projeto de disposição dos rejeitos como pastas minerais (BOGER, 2013; PASAPOUR *et al.*, 2014; SOFRA e BOGER, 2002).

## 2. Objetivos

Realizar o estudo das propriedades reológicas de polpas minerais e sua influência nas operações de desaguamento e produção de pastas, desenvolvendo um sistema floculante apto a alcançar simultaneamente múltiplas propriedades, como a separação sólido-líquido, recuperação de água (quantitativa e qualitativa), e formação de pastas, possibilitando a deposição de rejeitos da mineração de forma não convencional, com o propósito de minimizar os acidentes envolvendo falhas nas barragens e permitir o reuso da água de processo.

## 3. Material e Métodos

Polpas preparadas com teor de sólidos variando de 10 a 30% foram submetidas a ensaios de floculação e sedimentação descontínua, com diferentes polímeros floculantes, a fim de avaliar a influência da concentração inicial de sólidos ( $C_0$ ), e da dosagem e tipo de polímero no adensamento do sedimento.

### 3.1. Material

Os rejeitos minerais correspondem a uma amostra de lama vermelha (LV), resultante do processo Bayer de produção de alumina, proveniente de uma refinaria no estado do Pará, e rejeito da flotação de minério sulfetado de níquel (R-Ni), oriundo de uma barragem do estado de Minas Gerais. Para o preparo das polpas utilizou-se água da torneira, e como floclulantes, o polímero cartiônico Magnafloc LT 7990 (Mag), e dois polímeros aniônicos, R-10 e R-90. Todos os polímeros são produzidos pela Basf.

### 3.2. Métodos

A LV foi floclulada com o polímero Mag nas dosagens de 80 a 200 g/t, realizando-se um plano experimental fatorial completo a cinco níveis, com tréplica no ponto central e duas variáveis (Tabela 1). Além disso, foram realizados ensaios de sedimentação sem a adição de floclulante, pra cada  $C_0$ . O procedimento experimental para o R-Ni foi realizado com base no estudo de Andrade (2006). Assim sendo, polpas foram preparadas com  $C_0$  de 10, 15 e 23%, e submetidas a ensaios de floclulação com os polímeros aniônicos, R-10 e R-90. Ambos foram utilizados na dosagem de 80 g/t, que é o menor valor apresentado por Andrade (2006), com turbidez do sobrenadante e velocidade de sedimentação dos sólidos, apropriadas.

**Tabela 1.** Plano experimental fatorial completo para a LV.

Variáveis	- 2	- 1	0	+ 1	+ 2
% sólidos na polpa - $C_0$ (p/p)	10	15	20	25	30
Dosagem de polímero (g/t)	80	110	140	170	200

#### 3.2.1. Caracterização dos rejeitos minerais

Os rejeitos foram caracterizados em termos de distribuição granulométrica, com o equipamento Mastersize 2000, e de densidade de carga superficial, no Zetasizer nano series, para a faixa de pH de 2 a 12, utilizando-se soluções de KCl 0,001 e 0,01 M como eletrólito indiferente e soluções diluídas de HCl e KOH para ajuste do pH.

#### 3.2.2. Floclulação e espessamento dos rejeitos

As polpas foram preparadas e flocluladas em equipamento *jar test*, no qual o polímero foi adicionado à polpa sob rotação de 300 rpm, mantendo-se a agitação durante 1 min; em seguida, a velocidade de agitação foi reduzida para 150 rpm, e a polpa agitada por mais 2 min. Transferiu-se a polpa floclulada para sedimentação em uma proveta de 2 L, permanecendo em repouso por 24 h. Após esse período, o líquido sobrenadante foi removido e os sedimentos estudados segundo as propriedades, equipamentos e técnicas apresentados a seguir.

### 3.2.3. Caracterização dos rejeitos espessados

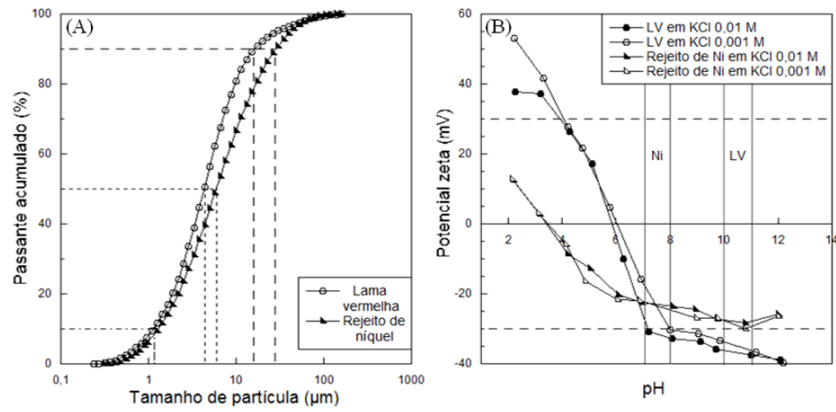
A caracterização dos sedimentos foi realizada segundo ensaios de abatimento *slump test* e reológicos. O teste de abatimento é padronizado para geometria cônica, e convencionalmente utilizado para determinar a consistência do concreto. No entanto, diferentes estudos relatam que pode ser aplicado para geometria cilíndrica e para a avaliação da consistência de polpas minerais (BOGER, 2009; CLAYTON; GRICE e BOGER, 2003; MIZANI e SIMMS, 2016). O procedimento experimental para determinação do percentual de abatimento (%ABT), é o mesmo relatado por Clayton; Grice e Boger (2013), utilizando-se um cilindro em PVC,  $H = D_{in} = 2$  in.

A  $\tau_0$  foi determinada para o sedimento de topo e de fundo da proveta, utilizando-se o reômetro RheoStress 1 da Haake, e o rotor vane. A metodologia experimental foi baseada nos estudos de Boger (2009, 2013), os quais relatam que a utilização do rotor Vane para determinação da  $\tau_0$ , impondo-se uma baixa rotação constante, é bem similar ao obtido pela curva de fluxo, além de ser utilizado para eliminar os efeitos de deslizamento, e aplicável às suspensões minerais. Assim sendo, nesse estudo, a  $\tau_0$  foi obtida por meio de ambas as técnicas: método direto e por regressão com base nos dados da curva de fluxo. No método direto, a tensão é avaliada em função do tempo, atingindo um valor de máximo, que é quando o material escoar, correspondendo a  $\tau_0$ . O ajuste dos dados da curva de fluxo foi realizado pelo modelo de Herschel-Bulkley ( $\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$ ). No procedimento experimental, primeiramente, a  $\tau_0$  do sedimento estruturado foi analisada aplicando uma deformação constante de 1 rpm por 180 s, sendo referida como  $\tau_0$  estática. Após isso, o sedimento foi submetido a uma taxa de cisalhamento constante de  $100 \text{ s}^{-1}$  por um período de 300 s, a fim de destruir a estrutura dos flocos e liberar a água contida. Esse sedimento tem seu ponto de fluidez referido como  $\tau_0$  dinâmica, e foi analisado por duas formas distintas: a primeira igual a anterior, e posterior a isso, realizou-se uma curva de fluxo variando a taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ) de 100 a  $0,01 \text{ s}^{-1}$ , com 10 pontos por década, e cada ponto obtido em um intervalo máximo de 5 min.

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1. Caracterização das amostras de rejeito mineral

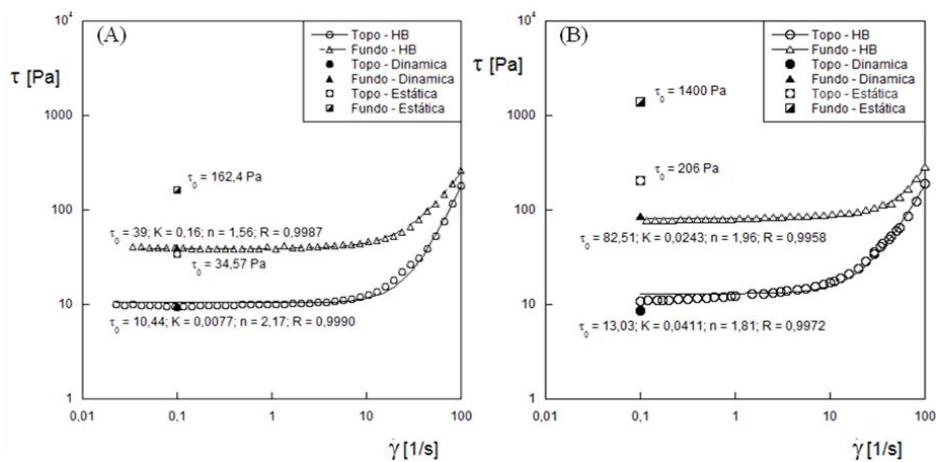
Os rejeitos estudados consistem de granulometria muito fina (Figura 1 A), e, a associação dessa característica à forte repulsão eletrostática existente em pH natural (LV:  $10,5 \leq \text{pH} \leq 11$ ; R-Ni:  $7 \leq \text{pH} \leq 8$ ), devido a densidade de cargas aniônicas (Figura 1 B), dificulta o processo de sedimentação natural e formação de sedimentos. No entanto a presença de material fino é indispensável para formação de pastas, verificando-se a necessidade do uso de flocculantes.



**Figura 1.** Caracterização dos rejeitos minerais. (A) distribuição de tamanho de partícula; (B) potencial zeta.

#### 4.2. Caracterização do rejeito espessado

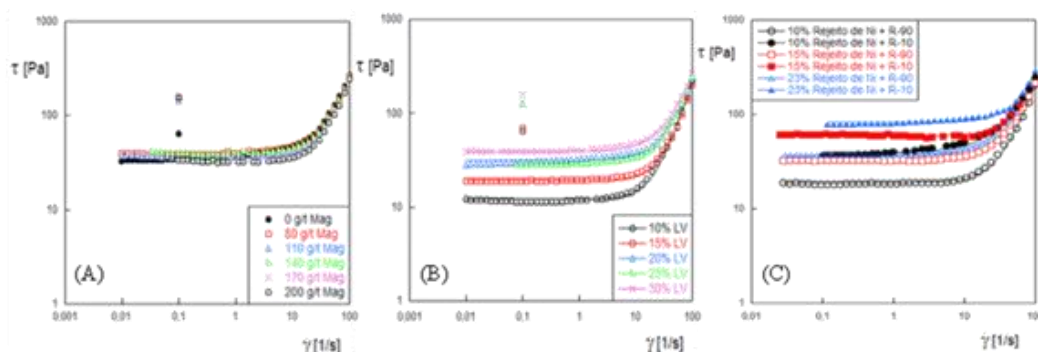
Os testes de sedimentação descontínua em escala de laboratório (proveta), foram realizados para obter informações referentes às características do *underflow* de um espessador de pastas, sob as condições estabelecidas. A Figura 2 exibe os valores de tensão para os sedimentos (topo e fundo) após floculação/sedimentação. Observa-se que em ambos os casos, as metodologias aplicadas para determinação da  $\tau_0$  dos sedimentos foram eficientes, ou seja, a  $\tau_0$  dinâmica determinada impondo-se uma deformação constante, é bem similar à obtida pela curva de fluxo, como relatado por Boger (2013). Observa-se, também, a variação da  $\tau_0$  do sedimento em função do perfil de concentração existente, devido à variação da concentração de sólidos na zona de compactação do sedimento (FRANÇA; BISCAIA e MASSARANI, 1999), e de acordo com Boger (2009, 2013) e Sofrá e Boger (2002) as propriedades de escoamento variam significativamente com a concentração de sólidos. Para os rejeitos estudados, a concentração de sólidos do sedimento ( $C_{sed}$ ) de topo, foi de até 28% menor que a do fundo, ou seja, em ambos os casos o sedimento do fundo está mais adensado, apresentando maiores valores da  $\tau_0$  (Figura 2). Em virtude disso, pode-se obter os extremos da  $\tau_0$ .



**Figura 2.** Curvas de escoamento para o fundo e o topo dos sedimentos espessados. (A) LV com  $C_0$  de 30%, e 140 g/t de Mag; (B) R-Ni com  $C_0$  de 23%, e 80 g/t de R-10.

A Figura 3 (A) mostra a dependência da  $\tau_0$ , com a dosagem de Mag para as polpas de LV. É possível observar que a adição de flocculante à polpa gera elevação da  $\tau_0$ , estática, porém o aumento da dosagem de Mag não altera os valores da  $\tau_0$ , - estática e dinâmica - do sedimento, sendo estas função da  $C_0$  (Figura 3-B). Isso ocorre porque a diferença na  $C_0$  influencia na forma e estrutura dos flocos formados, e consequentemente na velocidade de sedimentação e coesão do sedimento (PASAPOUR *et al.*, 2014). A relação da  $\tau_0$ , com a  $C_0$ , também é observada para o R-Ni na Figura 3 (C), que além disso evidencia a forte dependência com o tipo de flocculante. Observa-se na Figura 3 (C) e 4, que o R-10 promoveu maiores valores da  $\tau_0$ , - estática e dinâmica - do sedimento, alcançando 1400 e 83 Pa, respectivamente. A diferença de eficiência dos polímeros estudados para a floculação do R-Ni pode ser explicada pela diferença de interações polímero-partícula (JARVISA *et al.*, 2005). Contudo, para melhor compreensão é necessário a elucidação de suas estruturas e características. Os sedimentos de R-Ni, produzidos com ambos flocculantes, atingem a consistência de pasta, apresentando valores da  $\tau_0$  estática superiores a 200 Pa (Figura 4-A). No entanto, a  $\tau_0$ , dinâmica alcança valores de 82,5 e 37 Pa, para o R-10 e R-90, respectivamente (Figura 4-B), indicando que no caso de completa destruição dos flocos, o sedimento não apresenta a consistência de pasta. Porém, para rejeitos pastosos, a bomba centrífuga é substituída pela de deslocamento positivo, o que faz com que a destruição dos flocos seja bem menos intensa.

A Figura 5 ilustra a interdependência entre o %ABT,  $\tau_0$  estática e dinâmica,  $C_0$  e  $C_{sed}$ . Na Figura 5 (A), observa-se que a adição de flocculante à polpa, produz sedimentos mais consistentes, o que é evidenciado pela redução do %ABT. Observa-se, também, que para a mesma  $C_0$ , o aumento da dosagem de flocculante não influencia, de maneira significativa, o empacotamento do sedimento; isso é evidenciado pela pequena redução do %ABT, corroborando com os dados obtidos de  $\tau_0$ . As Figuras 5 (B e C) exibem a mesma tendência apresentada em diferentes estudos, ou seja, nota-se que para sedimentos mais adensados (maior  $C_{sed}$ ), obtém-se maiores valores de  $\tau_0$  e a consequente redução do %ABT (BOGER, 2009; CLAYTON; GRICE e BOGER, 2003). Observa-se também que o estudo com R-Ni permitiu a formação de sedimentos mais coesos, ou seja, com maior  $\tau_0$  e menor %ABT, alcançando 1400 Pa e 12%, respectivamente.



**Figura 3.** Curvas de escoamento para os sedimentos espessados (fundo). (A) LV com  $C_0$  de 30%, variando a dosagem de Mag; (B) LV com 80 g/t de Mag, variando  $C_0$ ; (C)  $\tau_0$  dinâmica para o R-Ni, variando  $C_0$  e o flocculante.

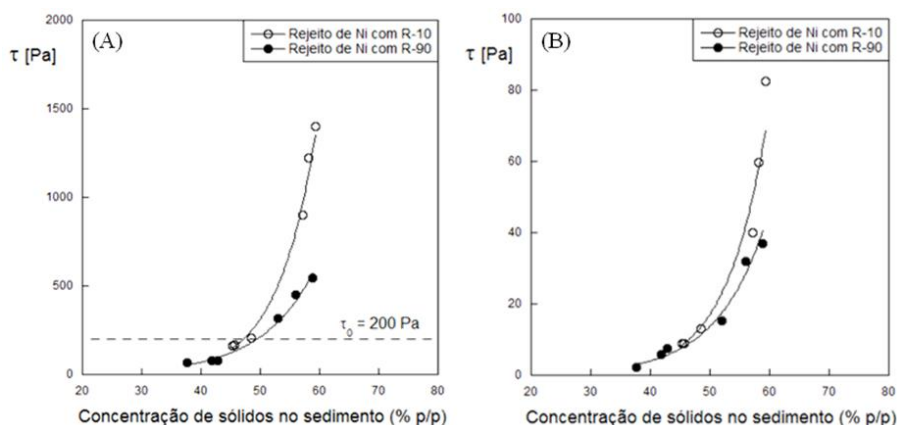


Figura 4.  $\tau_0$  como função da  $C_{sed}$  do R-Ni. (A)  $\tau_0$  estática; (B)  $\tau_0$  dinâmica.

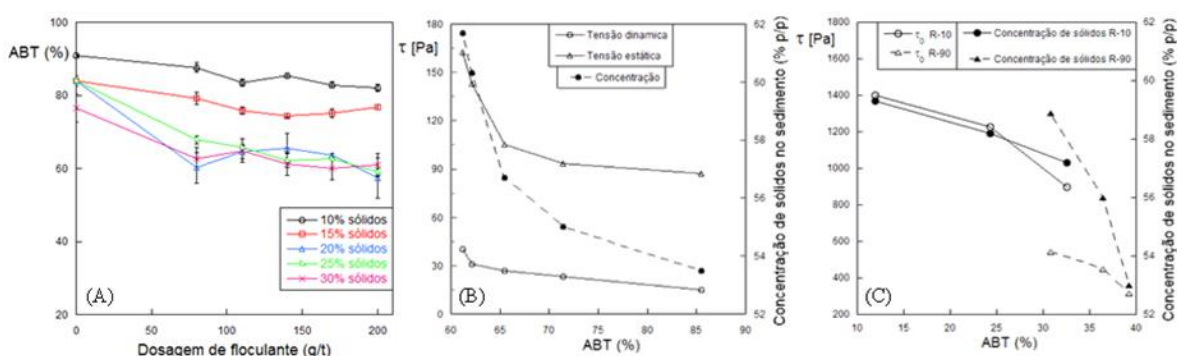


Figura 5. %ABT do sedimento (fundo) em função das variáveis estudadas. (A) dosagem de flocculante e  $C_0$  da LV; (B)  $\tau_0$ , estática e dinâmica, e  $C_{sed}$  de LV, com 140 g/t de Mag; (C) tipo de flocculante,  $\tau_0$  estática e  $C_{sed}$  do R-Ni.

## 5. Conclusão

O estudo da floculação/sedimentação da LV e R-Ni, permite a análise de que quanto maior a  $C_0$ , mais adensado e coeso é o sedimento, exibindo maior  $\tau_0$ , e menor %ABT. Verificou-se também que no caso da LV, o aumento da dosagem de magnafloc não alterou significativamente as características do sedimento, podendo-se fazer uso da menor dosagem, 80 g/t. Os polímeros R-10 e R-90 foram eficientes para floculação/sedimentação do R-Ni, proporcionando sedimentos com  $\tau_0$  estática superior à especificada para pastas. No entanto, esses valores são bem mais elevados para os sedimentos floculados com R-10, ou seja, esse polímero permite a formação de sedimentos mais coesos e estáveis. Vale ressaltar que, em todos os casos, o líquido sobrenadante apresentou turbidez abaixo de 100 NTU, o que permite a sua reutilização como água de processo. A aplicação das técnicas estudadas é viável para reduzir a quantidade de água livre bombeada para as barragens, produzindo sedimentos com características de pastas, além de permitir o reuso da água de processo.

## 6. Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa concedida através do Programa PCI/CETEM/MCT, à supervisora Sílvia França, aos companheiros de laboratório e ao CETEM pela infraestrutura.

## 7. Referências Bibliográficas

- Andrade, L.S. **Desaguamento de polpas minerais floculadas**. 2016. 52p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação), Universidade Federal do Rio de Janeiro - EQ/UFRJ, Rio de Janeiro (Brasil).
- Boger, D.V. Rheology and the resource industries. **Chemical Engineering Science**, v.64, p.4525–4536, 2009.
- Boger, D.V. Rheology of Slurries and Environmental Impacts in the Mining Industry. **The Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering**, v.4, p.239-257, 2013.
- Clayton, S., Grice, T.G., Boger, D.V. Analysis of the slump test for on-site yield stress measurement of mineral suspensions. **International Journal of Mineral Processing**, v.70, p.3-21, 2003.
- França, S.C.A., Biscaia JR. E.C., Massarani, G. Study of batch sedimentation simulation - establishment of constitutive equations. **Powder Technology**, v.101, p.157-164, 1999.
- Jarvisa, P., Jeffersona, B., Gregoryb, J., Parsons, S.A. A review of floc strength and breakage. **Water Research**, v.39, p.3121–3137, 2005.
- Mizani, S., Simms, P. Method-dependent variation of yield stress in a thickened gold tailings explained using a structure based viscosity model. **Minerals Engineering**, v.98, p.40–48, 2016.
- Parsapour, G.A., Hossininasab, M., Yahyaei, M., Banisi S., Effect of settling test procedure on sizing thickeners. **Separation and Purification Technology**, v.122, p.87–95, 2014.
- Sofrá, F., Boger, D.V. Environmental rheology for waste minimisation in the minerals industry. **Chemical Engineering Journal**, v.86 p.319-330, 2002.