



## OTIMIZAÇÃO E REDIMENSIONAMENTO DA SEDIMENTAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO FERRO

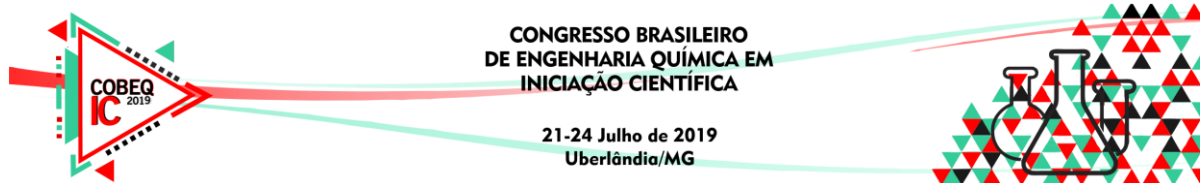
T. M. F.S. de OLIVEIRA<sup>1</sup>, F. A . B. CALDEIRA<sup>1</sup>, E. C. CALDEIRA<sup>1</sup>, L.D. RIBEIRO<sup>1</sup> e  
A. B. REIS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Instituto de Ciência e  
Tecnologia – Curso de Engenharia Química  
E-mail para contato: [tarcisio.michael@yahoo.com.br](mailto:tarcisio.michael@yahoo.com.br)

**RESUMO:** A sedimentação é uma operação unitária muito empregada na indústria, desde a reciclagem e reuso de recursos inclusive na indústria de mineração, onde há presença de rejeito de minério de ferro na lama de sedimentação. O estudo objetivou aperfeiçoar o processo de sedimentação analisando as variáveis pH e concentração do rejeito de minério, bem como comparar as características da partículas envolvidas na sedimentação. Os ensaios foram realizados, primeiramente em batelada, utilizando um planejamento fatorial completo 2<sup>2</sup>, incluindo os 4 pontos axiais e 4 pontos centrais para avaliação do erro puro e, em seguida, após a análise de concentração de partículas de rejeito presentes tanto no lodo quanto no clarificado, foram realizados cálculos dos parâmetros: Re (Número de Reynolds), Cd (Coeficiente de arraste),  $\rho_p$  (Densidade da partícula),  $V_p$  (Velocidade da partícula),  $V_s$  (Velocidade de sedimentação) e  $d_{st}$  (Diâmetro de Stokes). A partir dos dados obtidos, foi possível dimensionar um módulo didático de sedimentação, com capacidade de 1000mL. No âmbito desse contexto, foi possível inferir que a melhor sedimentação ocorreu em ambientes com pH de ácido para neutro, foi observado também, pela análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a influência do diâmetro de partícula nas fases do lodo e clarificado, propiciando inclusive a possibilidade de otimização em processos de recuperação de água, em processos de sedimentação da indústria de mineração.

### 1. INTRODUÇÃO

A mineração é considerada como uma das atividades industriais com maior potencial poluidor. Paralelamente, a legislação ambiental em muitos países é frágil, o que gera diversos conflitos entre a sociedade e a iniciativa privada. Isso provoca, na maioria das vezes, degradação ambiental, resultando em grandes problemas ambientais associados à atividade mineradora (FONSECA, 2008). Na busca de alternativas com o intuito de minimizar os resíduos da mineração, a reciclagem, através do reuso ou recuperação dos constituintes, assim como a criação e desenvolvimento de novos produtos, apresenta-se como uma boa alternativa, podendo ainda gerar valor econômico para a empresa. Dessa forma, a reciclagem pode ser considerada uma das formas mais atraentes de solução dos problemas de gerenciamento de



resíduos, tanto do ponto de vista da proteção do meio ambiente quanto empresarial (CABRAL e MORIS, 2010).

Para a viabilização da reciclagem, é necessário utilizar-se de operações unitárias, como por exemplo, a sedimentação (decantação), a qual é muito empregada em processos químicos industriais e bastante utilizada na remoção de partículas sólidas em suspensão, onde as fases sólidas e líquidas são separadas devido à ação da gravidade e pela diferença de densidade da partícula e da solução a qual está inserida. A sedimentação pode ser dividida em duas classes teoricamente ditas: o espessamento e a clarificação. Sendo que no espessamento, o produto de interesse é o sólido e na clarificação o produto de interesse é o líquido com aspecto límpido (NUNES, 2008).

Dessa forma, objetivou-se sedimentar amostras de rejeito de minério de ferro, cedidos pela mineradora Samarco Mineração S.A, primeiramente em batelada com provetas de 250 mL e posteriormente, redimensionando para o módulo de didático de sedimentação com volume de 1000 mL, com concentração e pH adequado. Em seguida, foram calculados os parâmetros: densidade da partícula, concentração da amostra no clarificado e no lodo, número de Reynolds, coeficiente de arraste, diâmetro de Stokes, velocidade de partícula e velocidade de sedimentação.

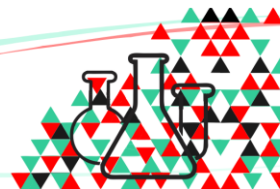
## 2. METODOLOGIA

A amostra de rejeito de minério de ferro foi cedida pela empresa Samarco Mineração S.A, na forma sólida (pó). Os experimentos em batelada, foram realizados em triplicata, de modo a viabilizar, com maior eficiência, as variáveis que interferem na sedimentação, essa etapa de otimização foi de crucial importância para o redimensionamento em módulo didático.

O rejeito passou apenas por um processo de peneiramento, utilizando-se a peneira de abertura de 10 mesh, simulando situação verdadeira. Para o processo de otimização, foi utilizado um planejamento fatorial completo  $2^2$ , incluindo os 4 pontos axiais e 4 pontos centrais para avaliação do erro puro, método descrito por Rodrigues e Lemma (2009), totalizando 12 ensaios. As variáveis empregadas no sistema foram o pH e a concentração de rejeito, sem adição de agente flocculante, variando pH 4,9 a 9,12 e concentração de rejeito de 28,9 a 71,2 % (m/m).

As doze amostras foram sedimentadas por trinta minutos em seus respectivos pH e concentração de rejeito, em seguida, foi realizada a leitura da turbidez. Com os melhores resultados, plotou-se o gráfico da altura do sedimentado (cm) *versus* tempo (minutos), em seguida, foi calculada a concentração de rejeito no clarificado e no lodo.

Para determinar a concentração de sólidos no clarificado e no lodo, pesou-se a placa de Petri com amostra e placa com o sólido tanto para o clarificado, quanto para o lodo, na sequência secas em estufa de secagem na temperatura de 104 °C, por um período de 24hrs, e pesados em seguida. Com esses dados, foi possível determinar a concentração de sólidos suspensos ( $C_{ss}$ ).



Para melhor entender a sedimentação envolvendo a relação entre o pH e a concentração de amostras foram feitas fotos por MEV, no qual buscou analisar as características das partículas envolvidas no processo, por isso analisou as amostras do clarificado e do lodo dos pH's ácido, neutro e básico, sendo eles 5,5, 7,0 e 9,12 respectivamente. A partir dessas fotos foi possível aferir o diâmetro médio das partículas da melhor sedimentação.

Em seguida, foi determinada a densidade da amostra pelo método de picnometria, onde, foram realizadas pesagens (g) do picnômetro vazio, do picnômetro com água e do picnômetro com água mais amostra de rejeito de minério de ferro.

A partir dos dados da densidade e do diâmetro da partícula, foram realizados os cálculos dos parâmetros: de Reynolds, coeficiente de arraste, diâmetro de Stokes, velocidade de partícula e velocidade de sedimentação, conforme ilustram as equações de 1 a 4 respectivamente (MASSARANI, 2002), para fim de entender melhor a sedimentação da partícula e velocidade de sedimentação. Assim, foi redimensionado para o módulo didático de sedimentação, com capacidade de armazenagem de 1 litro, onde foi realizada a reprodutibilidade dos experimentos de sedimentação.

$$Re = \frac{\rho_p V_s d_p}{\mu} \quad (1)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (2)$$

$$V_p = \frac{2.r^2.g.(\rho_p - \rho_f)}{9\mu} \quad (3)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{4.(\rho_p - \rho_f).g.(2r)}{3.C_D.\rho_f}} \quad (4)$$

onde:

$Re$  – número de Reynolds;  $V_s$  – velocidade de sedimentação;  $\rho_p$  – densidade da partícula;  $d_p$  – diâmetro da partícula;  $\mu$  – viscosidade do fluido;  $V_s$  – velocidade de sedimentação;  $r$  – raio da partícula;  $g$  – gravidade;  $\rho_f$  – densidade do fluido.

### 3. Resultados e discussão

Analisar as variáveis de um processo é de grande importância para otimização, redução de custos e melhoria na produção final, por isso, analisou-se as concentrações de rejeito de minério e pH na sedimentação em proveta de 250 mL, utilizando o planejamento fatorial. De acordo com a Figura 4, podemos inferir que a região de pH ótimo varia entre 5,0 até 7,0 e a concentração variou de 20 a 70 %, sendo que a melhor sedimentação foi em pH 6,85 e concentração 50%, apresentando no clarificado, uma turbidez de 111 NTU, em 30 minutos de sedimentação. Observando a Figura 2, é notório a verificação do clarificado mais claro em pH's mais baixo, ao contrário dos pH's básicos.

Na Figura 1 apresentou um  $R^2$  de 96,98 %, sendo um ótimo resultado, verificando que os dados obtidos apresentam um grande índice de confiança. A variação na faixa de pH e de

concentração é um ponto positivo, uma vez que em processo contínuo essas variáveis podem sofrer mudança, demonstrando uma região de segurança.

Figura1 – Planejamento fatorial variando pH e concentração do rejeito de minério.

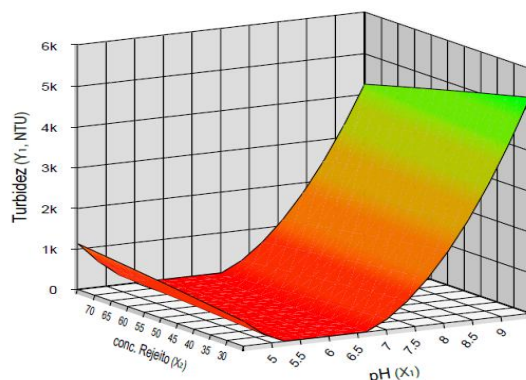
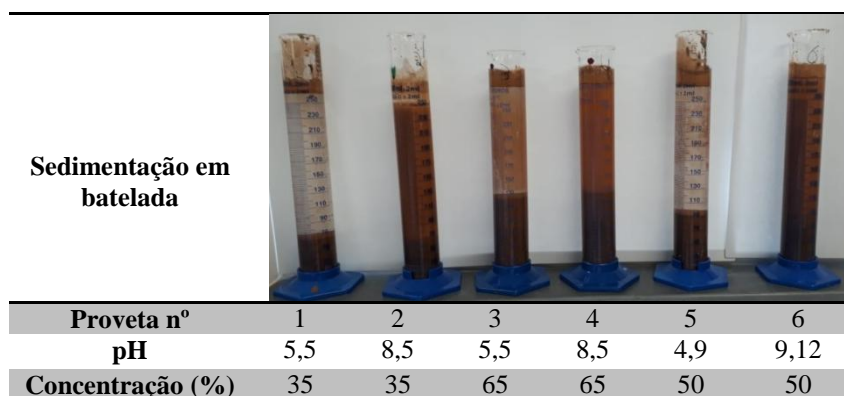


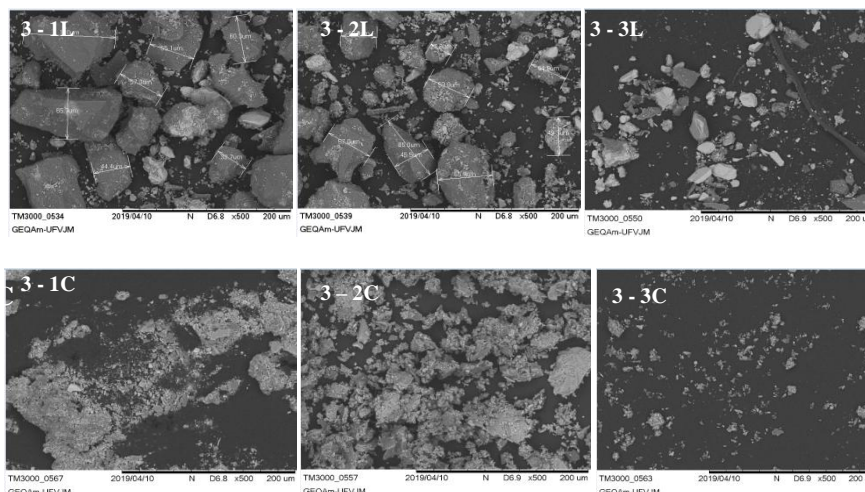
Figura 2 – Sedimentação em proveta da amostra de minério de ferro em diferentes pH e concentração de rejeito de minério.



Em seguida, foram verificadas as concentrações de rejeito no clarificado e no lodo, no clarificado apresentou  $0,00037 \text{ g/cm}^3$  sólido seco já no lodo apresentou  $0,571 \text{ g/cm}^3$  sólido seco, esses dados demonstram que o clarificado apresenta baixa concentração em relação ao lodo, mais de 1500 vezes, indicando que o método de sedimentação apresentou grande eficiência, conforme ilustra a Figura 2.

Analisando as imagens de MEV (Figuras 3 – 1L,1C, 2L, 2C, 3L, 3C) o pH que apresentou o melhor clarificado foi do ácido para neutro, representados na Figura 3 como 1 e 2 respectivamente. Pode-se observar que as partículas presentes no lodo apresentaram maiores diâmetros que as partículas presentes no clarificado e, em ambiente básico (pH 9,12) as partículas do lodo apresentaram diâmetro menor nos ambiente ácidos (pH 5,5) e neutros (pH 7,0), confirmando que o diâmetro da partícula tem influência direta na sedimentação, visto que quanto maior a partícula, melhor será a sedimentação devido a ação gravitacional, e nesse caso, os melhores resultados foram em pH's de ácidos a neutros.

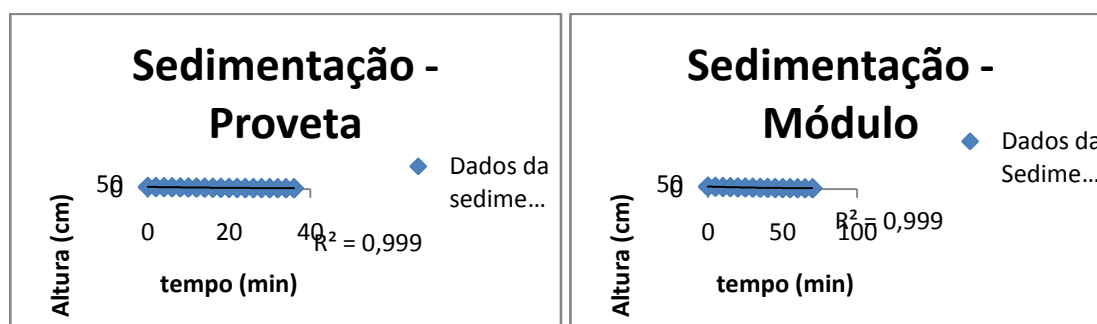
Figura 3 – Imagens de MEV para o Lodo (1L (pH 5,5), 2L (pH 7,0) e 3L (pH 9,12) e para o clarificado (1C (pH 5,5), 2C (pH 7,0) e 3C (pH 9,12)), ampliado 500 vezes.



Com as imagens do MEV obteve-se o diâmetro das partículas do lodo de  $57,06 \mu\text{m}$  e densidade de  $1,0051 \text{g/cm}^3$ , foi possível determinar o número de Reynolds de  $6,68 \times 10^{-5}$ . Como  $Re > 1$ , o regime se adequa ao de Stokes, segundo SILVA (2006), e, a partir de então foi possível obter um coeficiente de arraste de 359053,44. O diâmetro de Stokes apresentou  $1,60 \times 10^{-5} \text{m}$ , a velocidade da partícula de  $9,11 \times 10^{-8} \text{m/s}$  e velocidade de sedimentação de  $0,0001 \text{m/s}$ .

Assim, foi possível redimensionar a operação de sedimentação para um módulo didático, com capacidade para 1000 mL, no pH 6,85 e concentração de 50% de rejeito de minério, que de acordo com o Figura 4, a sedimentação com a proveta durou 36 minutos, já no módulo foi com 70 minutos, quase o dobro de tempo gasto na proveta, no entanto, o volume aumentado de um para o outro foi de 4 vezes, então o tempo de sedimentação pode ser considerável como aceitável, além disso, os dois gráficos apresentaram  $R^2$  de 0,999, sendo um índice de confiança muito bom. A turbidez do clarificado foi de 133 NTU, o que implica em afirmar que houve um aumento de 22 NTU. Analisando a velocidade de sedimentação, com proveta obteve velocidade  $0,0001 \text{m/s}$ , com o módulo  $0,00007 \text{m/s}$ , comprovando a velocidade maior de sedimentação na proveta.

Figura 4 – Sedimentação em proveta e no módulo do rejeito da mineradora Samarco S.A





## 4. CONCLUSÃO

Nos ensaios com as provetas pode-se concluir que a melhor sedimentação acontece em ambiente com pH de ácido a neutro, com concentrações baixas a elevadas de rejeito, dado considerado de elevada importância, considerando que mudanças bruscas de concentração podem acontecer sem que haja perda de eficiência. No MEV obteve-se o diâmetro médio da partícula de 57,06  $\mu\text{m}$ , e observou-se que as partículas com melhor sedimentação apresentam maiores diâmetros, sofrendo mais com o efeito da gravidade e, assim, sedimentando. A concentração de rejeito no clarificado apresentou um percentual muito menor que no lodo, mais de 1500 vezes. Além disso, com o número de Reynolds de  $6,68 \times 10^{-5}$ , foi possível concluir que o escoamento se encontra num intervalo que o classifica no regime de Stokes, direcionando assim, a sequência de cálculos que nos permitiu determinar o coeficiente de arraste de 359053,44. O diâmetro de Stokes foi de  $1,60 \times 10^{-5}$  m, a velocidade da partícula de  $9,11 \times 10^{-8}$  m/s e velocidade de sedimentação de 0,0001 m/s. Dessa forma, no rejeito da mineração todo material pode ser aproveitado após a sedimentação utilizando outras operações, tanto o clarificado, recuperando a água, quanto o lodo, utilizando a lama para aplicações diversas, tais como: materiais cerâmicos, reprocessamento na obtenção de minerais, aproveitamento na construção civil entre outros, assim substituindo ou desafiando a destinação final, as barragens de minério.

## 5. REFERÊNCIAS

- CABRAL, M. S.; MORIS, V. A. S.; *Reaproveitamento da Borra de Café como Medida de Minimização da Geração de Resíduos*. São Carlos, SP, Brasil, 2010.
- FONSECA, D. C. A. Alternativas de reuso de água em indústrias de beneficiamento de minério. **Monografia**. Universidade Federal de Minas Gerais. 2008.
- MASSARANI, G. Fluidodinâmica em Sistemas Particulados. 2ª edição, Rio de Janeiro, E-papers Serviços Editoriais, 2002.
- NUNES, J. F. Estudo Da Sedimentação Gravitacional De Suspensões Floculentas. **Dissertação de Mestrado**, Universidade Federal de Uberlândia. 2008.
- RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F. *Planejamento de Experimentos e Otimização de processos*. Campinas, São Paulo: Editora Cárita, 2009.
- SILVA, R. G. Estudo numérico de movimentação de partículas em escoamento. **Dissertação de mestrado**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.