

CONSTRUÇÃO DE MÓDULO DE ELUTRIAÇÃO COMO FERRAMENTA DE CONTEXTUALIZAÇÃO PARA O ENSINO DE OPERAÇÕES UNITÁRIAS

Caroline Klinger¹, Nataly Leidens², Isaac dos S. Nunes³

¹ URI Campus Santo Ângelo, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação, ca_klinger@hotmail.com

² URI Campus Santo Ângelo, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação, nataly@san.uri.br

³ URI Campus Santo Ângelo, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação, isaac.eq@san.uri.br

RESUMO: As operações unitárias são etapas que se repetem ao longo dos mais diversos processos industriais. A depender da instituição, o ensino destas operações ocupa de 3 a 4 semestres da estrutura curricular de um curso de graduação em Engenharia Química. O ensino contextualizado destas disciplinas, aliado a atividades práticas se faz necessário como uma medida de estimular o conhecimento e despertar o interesse dos estudantes. Em vista disso, este trabalho objetivou a construção e levantamento de parâmetros de operação de um módulo experimental elutriador para aplicação na separação de uma amostra de terra diatomácea. Os resultados mostraram que o equipamento pode ser empregado nesta separação, apresentando resultados condizentes com a literatura. Desta forma, este experimento será empregado como atividade prática na disciplina de Laboratório de Engenharia Química I, do curso de Engenharia Química na Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, no câmpus de Santo Ângelo.

Palavras Chaves: elutriação, separação de sólidos, operações unitárias.

1 INTRODUÇÃO

Originalmente, formação em Engenharia Química foi idealizada para fornecer subsídios de atuação a um profissional exclusivamente na indústria química, diferenciando-se de um químico tradicional, por permitir o trabalho em grande escala, com processos preferencialmente contínuos (CREMASCO 2015). Atualmente, a formação de um Engenheiro Químico tem como princípios a matemática, a química, a física e a biologia, além de contar com ciências técnicas da Engenharia, que permitem ao profissional a resolução de problemas que estejam relacionados ao projeto, operação e instalação de plantas industriais, onde ocorrem os mais diversos processos, com variadas transformações em níveis moleculares e macroscópicos, em grande ou pequena escala e ainda em processos em batelada ou contínuos (CREMASCO, 2015).

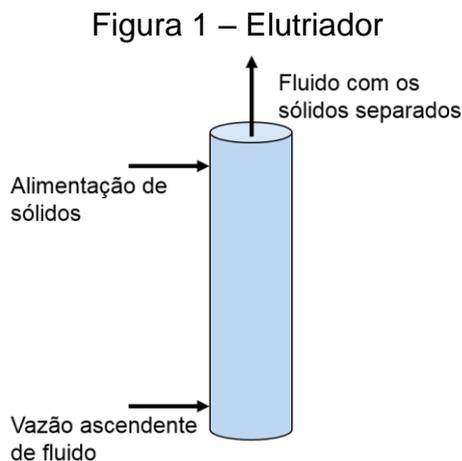
A atuação profissional de um Engenheiro Químico está intimamente ligada ao desenvolvimento de operações unitárias, que são as pequenas divisões que compõem os mais diversos processos industriais. O período de 1915 a 1960 apresentou o crescimento científico e período de desenvolvimento das operações unitárias, onde houve interesse científico em identificar as

etapas que se repetiam em processos industriais (CREMASCO, 2015). Estas operações podem se dividir em operações de transferência de movimento e sistemas particulados e fluidodinâmicos, operações de transferência de calor, de massa e de calor e massa.

Dentro das operações em sistemas fluidodinâmicos com sistemas particulados podemos encontrar a filtração, sedimentação, fluidização, leitos fixos, fluidizados ou de jorro, além da elutriação.

A elutriação consiste em uma operação de separação baseada na diferença entre a velocidade média do fluido (u) e a velocidade terminal da partícula (u_T) (CREMASCO, 2014). Assim, no elutriador, as partículas com diferentes diâmetros e massas específicas apresentam distribuições de velocidades terminais distintas e isso é utilizado como fator determinante na separação das frações de sólido (SILVA, 2016).

O equipamento de elutriação consiste em uma coluna de diâmetro conhecido (D_1), onde uma amostra de partículas é alimentada perto do topo da coluna, enquanto o fluido (água, na maioria das vezes) é alimentado com uma vazão volumétrica Q perto da base da coluna em questão (CREMASCO, 2014). A Figura 1 apresenta uma exemplificação de um elutriador.



Fonte: os autores.

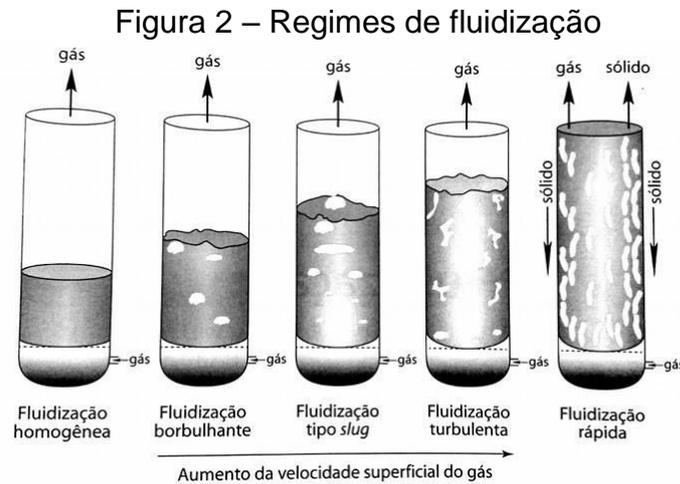
Este processo de separação de partículas consiste fundamentalmente numa “sedimentação ao contrário”, ou seja, é o fluido que se move através da zona onde as partículas sólidas se encontravam dispersas inicialmente (FOUST *et al.*, 2011).

Foust *et al.* (2011) ainda destaca que existem duas formas para que esta separação ocorra: se o material for homogêneo, a separação será por diferença de diâmetro entre as partículas; já se a mistura for heterogênea, a separação se dará pela diferença de velocidade terminal das partículas e pela diferença de densidade entre elas.

Muitas vezes a operação unitária de elutriação é realizada com ar. Esta técnica é particularmente importante para a determinação do tamanho de poeiras contaminantes. Assim, a grande vantagem do elutriador é que ele permite efetuar a medida instantânea das partículas separadas (GOMIDE, 1980).

Para melhor entendimento do funcionamento de elutriadores, cabe revisar os regimes fluidodinâmicos durante a fluidização. Tais regimes dependem das características físicas da fase particulada (distribuição

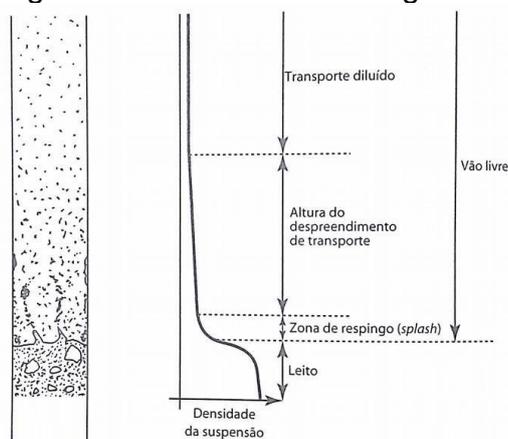
granulométrica, tamanho médio de partículas, forma e massa específica) e da fase fluida (viscosidade dinâmica e massa específica), bem como das condições operacionais da coluna (temperatura e vazão da fase fluida, compactação da fase particulada, altura e diâmetro). Os regimes fluidodinâmicos que podem ser identificados, conforme a Figura 2, são: fluidização homogênea, fluidização borbulhante, fluidização do tipo *slug*, fluidização turbulenta e fluidização rápida (CREMASCO, 2014).



Segundo Cremasco (2014), a partir da fluidização turbulenta, um pequeno acréscimo na velocidade superficial do fluido acarreta a elutriação, ou seja, o arraste da fase particulada. No regime de elutriação, o carregamento de partículas provoca a formação de diferentes regiões termodinâmicas, ilustradas na Figura 3:

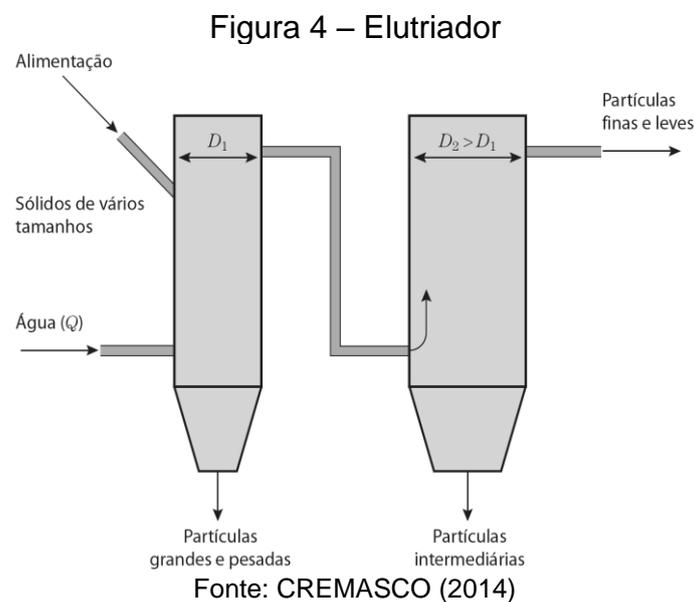
- Região de respingo: região imediatamente acima da superfície do leito, onde as partículas maiores retornam ao leito;
- Região de desprendimento: região acima da zona de respingos, caracterizada por apresentar gradiente de concentração da fase particulada e movimento intenso de partículas no leito;
- Região de transporte: localizada acima da zona de desprendimento, onde há transporte pneumático ascendente de partículas.

Figura 3 – Regiões características do regime de elutriação



O processo de elutriação pode ocorrer de duas formas: elutriação em batelada e elutriação contínua. A operação em batelada (Figura 1) consiste em um único equipamento onde, com sucessivas paradas do processo e alterações de vazões, separam-se variadas frações do sólido. Já a operação contínua compõe-se de um conjunto de elutriadores de diferentes diâmetros em ordem crescente e com uma vazão de fluido constante, gerando diferentes velocidades (SILVA, 2016).

Na elutriação contínua, exemplificada na Figura 4, quando a velocidade média do fluido for maior que a velocidade terminal da partícula, as partículas de diâmetro ou massa específica menor serão carregadas para uma nova coluna, de diâmetro D_2 (maior que D_1). Por outro lado, as partículas que apresentarem massa específica ou diâmetro maior são coletadas no fundo da coluna (CREMASCO, 2014).



Cremasco (2014) destaca que, como a elutriação utiliza como princípio físico a velocidade terminal, diversos modelos surgiram na tentativa de estimar a correlação entre a partícula, o fluido e a velocidade terminal. Assim, o modelo de Stokes descreve o movimento de uma esfera em um fluido, pelas Equações 1, 2 e 3.

$$C_D \cdot Re_p^2 = \frac{4}{3} \frac{\rho(\rho_s - \rho)gD_p^3}{\mu^2} \quad (\text{Equação 1})$$

$$Re_p = \left[\left(\frac{C_D \cdot Re_p^2}{24} \right)^{-n} + \left(\frac{C_D \cdot Re_p^2}{0,43} \right)^{-\frac{n}{2}} \right]^{-\frac{1}{n}} \quad (\text{Equação 2})$$

$$Re_p = \frac{D_p \rho U_T}{\mu} \quad (\text{Equação 3})$$

sendo: ρ é a massa específica do fluido [kg/m^3], ρ_s é a massa específica do sólido [kg/m^3], g é a aceleração da gravidade [m/s^2], D_p é o diâmetro médio da partícula [m], μ é a viscosidade dinâmica do fluido [$\text{Pa}\cdot\text{s}$], Re_p é o número de Reynolds para a partícula [-], n é uma constante e tem valor de 0,95 e U_T é a velocidade terminal da partícula [m/s].

Como aplicação da operação de elutriação, pode-se citar o estudo de Silva (2016), que objetivou a separação da matéria orgânica presente no sedimento de rios para sua posterior utilização. Já Kloeckner, Englert e Rubio (2011) propuseram a utilização de um elutriador para a recuperação da pirita presente em rejeitos do processamento de carvão para aplicação na elaboração de reagentes e enxofre. Telles *et al.* (2009), por outro lado, inseriram a elutriação como etapa inicial para separação e reutilização de resíduos finos oriundos do processo siderúrgico. Tendo em vista a reciclagem de baterias de íons de lítio, Kameoka, Espinosa e Tenório (2009) obtiveram resultados satisfatórios na separação entre plásticos e metais utilizando a elutriação.

Diversos processos já empregados na indústria, bem como novos estudos, exigem a necessidade de separar partículas sólidas. Tendo isso em vista, o objetivo do trabalho é a construção de um módulo experimental de elutriação, em escala laboratorial e com a utilização de materiais de baixo custo, como ferramenta de contextualização para o ensino de operações unitárias.

2 METODOLOGIA

A construção do equipamento de elutriação teve por objetivo a utilização de equipamentos de baixo custo. Para tanto, utilizaram-se os seguintes materiais: tubo de acrílico (25 mm de diâmetro), união soldável (25 mm), tampão soldável (25 mm), mangueira de borracha e tela metálica para suporte do material a ser separado. A configuração final do equipamento se encontra na Figura 5.

Figura 5 – Módulo de elutriação



Fonte: os autores.

O sólido utilizado nos ensaios de elutriação foi terra diatomácea, material de origem sedimentar, formado a partir da acumulação de carapaças de algas microscópicas. Também chamada de diatomita, este sólido é constituído por sílica amorfa, Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , óxidos e água e apresenta tamanho de partícula entre 4 e 500 μm (FONTES, 2010).

A operação do elutriador foi realizada com água por meio de uma bomba peristáltica. Para o ensaio inicial, calculou-se a vazão de água a ser bombeada no elutriador levando-se em conta a velocidade terminal dos sólidos a partir do diâmetro médio de partículas informado na literatura (55 μm), por meio das Equações 1, 2 e 3, acima citadas. Com o ensaio nessa condição de operação verificou-se a necessidade de se aplicar vazões menores para uma melhor separação das partículas, devido a grande faixa de variação do diâmetro de partícula da terra diatomácea. Assim, realizou-se um segundo ensaio, onde o fluido operou em diferentes vazões com o objetivo de separar diferentes diâmetros do material. A água das amostras coletadas após cada teste de vazão foi evaporada em estufa a 105° C e a massa de terra diatomácea obtida foi aferida em balança analítica.

Os parâmetros utilizados nos cálculos estão descritos na Tabela 1. Os dados referentes à terra diatomácea foram obtidos de experimentos realizados por Fontes (2010). Já os dados referentes ao fluido foram retirados de tabelas de propriedades da água, presentes na literatura.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados nos cálculos

Diâmetro médio de partícula (D_p)	55 μm
Massa específica real da partícula (ρ_p)	2200 kg/m^3
Massa específica da água (ρ)	1000 kg/m^3
Viscosidade dinâmica da água (μ)	$1,002 \cdot 10^{-3}$ Pa.s
Diâmetro interno do tubo	21 mm

Fonte: os autores.

3 RESULTADOS E ANÁLISE

No ensaio inicial operou-se o elutriador a uma vazão de 38,9 mL/min, onde atingiu-se uma velocidade terminal das partículas de terra diatomácea de 0,0019 m/s. Com essa condição de operação verificou-se que uma grande variedade de diâmetros de partículas da amostra foi carregada, fazendo com que a separação não fosse satisfatória.

Com o objetivo de separar a massa total de terra diatomácea em diferentes frações, variou-se a vazão de alimentação de líquido no equipamento e, com isso, obtiveram-se diferentes valores de velocidade ascensional para o líquido, o que resultou no carregamento das massas de terra diatomácea em função do diâmetro das partículas. Os resultados deste ensaio estão dispostos na Tabela 2, a seguir. As vazões estabelecidas na Tabela 2 foram calculadas para que houvesse separação de partículas com variação de diâmetros de cerca de 15 μm . O valor de 4,27 mL/min representou o mínimo valor de rotação disponível na bomba empregada nestes experimentos (cerca de 1 rpm).

Tabela 2 – Resultados dos testes de vazões

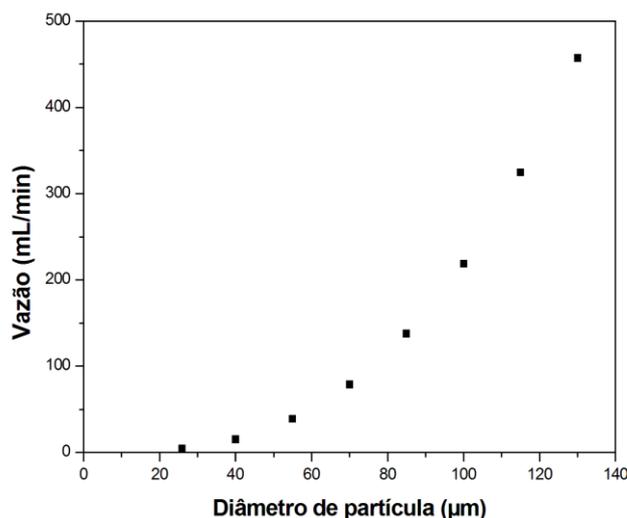
Teste	Vazão (mL/min)	Diâmetro de partícula (µm)	Massa de amostra coletada (g)
1	4,27	26	0,03
2	15,26	40	1,42
3	38,91	55	4,84
4	78,57	70	2,58
5	137,55	85	0,99
6	218,73	100	0,45
7	324,55	115	0,23
8	457,03	130	0,27

Fonte: os autores.

A Figura 6 apresenta a variação da vazão de alimentação em função dos diâmetros de partículas médias separadas nesta operação. Os resultados mostram que, mesmo uma vazão muito próxima de zero (4,27 mL/min) já resulta em arraste de partículas com diâmetro de cerca de 26 µm (ou menores).

A medida que aumenta o valor de vazão empregada no módulo, o diâmetro das partículas separadas aumenta. No entanto, este aumento não é linear. Para o arraste de partículas de 55 µm, é necessária uma vazão de 38,91 mL/min. Para aumentar o diâmetro de arraste para 70 µm, é necessário que a vazão aumente para 78,57 mL/min. Neste caso, a diferença entre os diâmetros foi de 15 µm e a variação na vazão foi de 39,66 mL/min. Se desejarmos continuar a separação e coletar partículas de até 85 µm, a variação de diâmetro continuará sendo de 15 µm, enquanto a variação imposta à vazão será de 58,9 µm. Com isso, se observa que, a medida que aumenta o tamanho médio das partículas, cada vez mais serão maiores as vazões necessárias para isso.

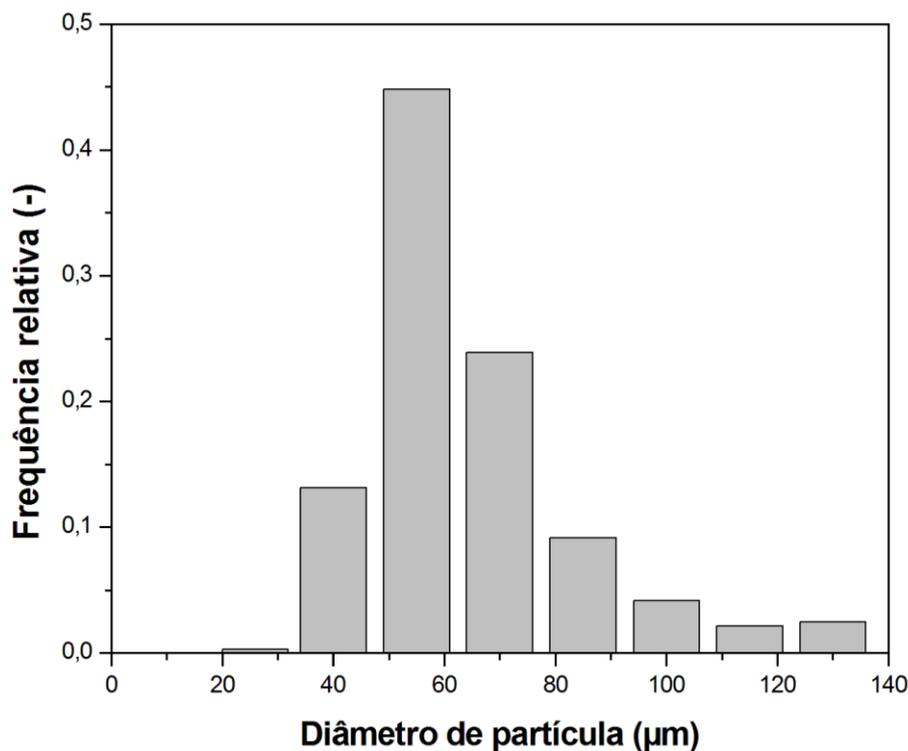
Figura 6 – Variação da vazão de água em função do diâmetro das partículas.



Fonte: os autores.

A Figura 7 apresenta o histograma da distribuição de frequência das partículas separadas por elutriação.

Figura 7 – Histograma de distribuição de frequências das partículas elutriadas.



Fonte: os autores.

Os resultados da Figura 7 mostram que as partículas apresentam uma distribuição de partículas uniforme, sendo a maior fração de partículas (44,77% da amostra) coletadas com diâmetro médio de 55 µm. Este resultado está de acordo com o apresentado por Fontes, 2010, que apresentou o diâmetro médio da terra diatomácea como sendo de 55 µm.

De acordo com os dados da Figura 7, 13,41 % da amostra foi separada com vazões que arrastaram partículas menores que 55 µm, restando ainda 41,81% da amostra com diâmetros maiores que 55 µm. Embora a porcentagem de partículas com diâmetros maiores que 55 µm seja representativa se comparada a fração com maior frequência (44,77%), temos uma fração acumulada, que conglobera diversos diâmetros diferentes, o que nos faz observar que o diâmetro médio mais representativo para esta amostra é de (até) 55 µm.

A montagem deste experimento permite a contextualização de vários saberes aplicados e desenvolvidos na disciplina de Operações Unitárias A-I. A avaliação dos resultados, por meio de cálculos de vazão e velocidade de fluidos, revisa aspectos de disciplinas como Mecânica dos Fluidos e Mecânica dos Fluidos Aplicada, a construção de um histograma e avaliação dos dados que ele fornece, revisa os conteúdos de Análise granulométrica, também da disciplina de Operações Unitárias A-I. Deste modo, percebe-se que esta atividade prática contribui muito para a contextualização dos saberes, instigando os acadêmicos ao conhecimento, favorecendo a visualização prática dos conceitos abordados em sala de aula, em diversas disciplinas ao longo de sua graduação.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostraram que foi possível construir um módulo de elutriação para a separação de uma amostra de terra diatomácea em suas diversas frações de diâmetros de partícula médios. A construção e operação do módulo conglomeram diferentes conteúdos das disciplinas obrigatórias da estrutura curricular de um curso de graduação em Engenharia Química, o que permite a contextualização dos saberes destas disciplinas, permitindo aos estudantes a visualização de um processo de separação a partir de um dispositivo construído a partir de materiais de baixo custo. A maior fração de partículas elutriada apresentou diâmetro médio de partícula de 55 µm, condizente com a literatura.

5 REFERÊNCIAS

CREMASCO, Marco A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidodinâmicos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2014.

CREMASCO, Marco A. **Vale a pena estudar Engenharia Química**. 3° ed. São Paulo: Blucher, 2014.

FONTES, Vilsinéia dos A. **Estudo de adsorvente obtido de terras diatomáceas para remoção de metais pesados em águas produzidas: processamento, caracterização e dinâmica em leito fixo**. p. 116, Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das operações unitárias**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2011.

GOMIDE, Reynaldo. **Operações unitárias: separações mecânicas**. vol. 3. São Paulo: R. Gomide, 1980.

KAMEOKA, Fernando; ESPINOSA, Denise C. R.; TENÓRIO, Jorge A. S. Sustentabilidade na indústria eletrônica: reciclagem de cobre e alumínio de baterias de íons de lítio. **Tecnologia em metalurgia, materiais e mineração**, São Paulo, v. 5, n. 4, p. 219-223, 2009.

KLOECKNER, Jonas; ENGLERT, Alexandre H.; RUBIO, Jorge. Recuperação do mineral pirita (FeS₂) de rejeitos do processamento de carvão por elutriação aquosa. In: XX Feira de Iniciação à Inovação e ao Desenvolvimento Tecnológico. **Anais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

SILVA, Eduardo R. **Análise experimental e numérica do sistema de separação via elutriação de sedimento de drenagem**. p. 88, Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2016.

TELLES, Fernanda F. G.; ABREU, Evandro J. P. de; HALASZ, Marcos R. T.; ARAÚJO, João A. de. Reutilização de resíduos finos oriundos do processo

siderúrgico. In: VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. **Anais**. Uberlândia: Faculdade de Aracruz, 2009.