

SEPARAÇÃO DA MATÉRIA CARBONOSA CONTIDA EM REJEITOS DE CARVÃO DE MOÇAMBIQUE POR FLOTAÇÃO

Ana Flávia ROSA¹; Meise PAIVA²; Jean SILVEIRA³; Douglas ALEGRE⁴; Eunírio Zanetti FERNANDES⁵; Jorge RUBIO⁶.

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, afr_anaflaviarosa@hotmail.com; ²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, meise.paiva@ufrgs.br; ³Universidade Federal do Rio Grande do Sul, jeanrmsilveira@gmail.com; ⁴Universidade Federal do Rio Grande do Sul, douglasaga@hotmail.com; ⁵ Instituto Tecnológico Vale, eunirio.zanetti@itv.org; ⁶Universidade Federal do Rio Grande do Sul, jrubio@ufrgs.br.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar e definir alternativas para a concentração de matéria carbonosa residual em rejeitos de carvão de Moçambique, através da flotação. Para tanto, foi utilizada uma amostra de rejeito fino proveniente dos circuitos das espirais concentradoras e da flotação. As amostras foram secas à temperatura ambiente, homogeneizadas e quarteadas pelos métodos de pilha longitudinal e cônica, para obtenção de alíquotas a serem caracterizadas e ensaiadas. Foram realizadas análises granulométricas a úmido e as frações obtidas foram analisadas pelos teores de matéria mineral ("cinzas"). Desse modo, foram determinadas as distribuições de teores e simulados cortes granulométricos para adequação da granulometria ao processo seguinte. Também foram realizados estudos de flotação com diferentes condições de granulometria (-48 e -65 #) da alimentação, obtidas por peneiramento a seco, e reagentes empregados (Betacol - reagente comercial constituído por 70 % de querosene e 30 % de espumante -, óleo diesel e de pinho). A distribuição definida por peneiramento a úmido apresentou um top size de 1650 µm e diâmetro médio (d_{50}) de 470 µm. A amostra apresentou granulometria grossa (rejeitos de beneficiamento gravimétrico de finos) e foi necessária sua adequação para os estudos de flotação. As simulações mostraram que ao se realizar um corte granulométrico em 48 #, a perda mássica em relação à massa inicial da amostra seria de 66,5 % e acréscimo de 4,2 % no teor de cinzas, enquanto que, para o corte em 65 #, esses parâmetros seriam de 78,2 % e 7,1 %, respectivamente. Os melhores resultados da flotação foram obtidos com a fração -65 # e a melhor condição de reagentes foi óleo diesel (420 - 900 g.t⁻¹) e óleo de pinho (105 - 225 g.t⁻¹), possibilitando recuperar entre 74-94 % da matéria carbonosa contida no material e com teores da matéria mineral, da ordem de 17 - 32 %, compatíveis para "blending", ou como produto final. O estudo continua, avaliando parâmetros operacionais e outros fluxogramas de flotação.

Palavras-chave: Rejeito de carvão. Caracterização. Flotação.

ABSTRACT

The present work aimed to characterize and define alternatives for the concentration of residual carbonaceous matter in coal tailings from Mozambique through froth flotation. For this purpose, a fine tail sample from the spiral concentrator and flotation circuits was used. The samples were dried at room temperature, homogenized and quartered using the longitudinal and conical pile methods, in order to obtain aliquots to be characterized and tested. Wet particle-size analyzes were performed, and the fractions obtained were analyzed for mineral matter ("ash"). Thus, the contents distributions were determined and grain size cuts were simulated to suit the granulometry to the downstream processes. Furthermore, flotation studies were developed with different feed particle size conditions (-48 and -65 #), previously obtained by dry sieving, and reagents used (Betacol – commercial reagent made of 70 % of kerosene and 30 % of frother -, diesel and pine oil). The particle-size distribution achieved by wet sieving presented a top size of 1650 µm and mean diameter (d_{50}) of 470 µm. The sample presented a course particle size content (tailings from fine gravimetric beneficiation) and its adequacy was necessary for the flotation studies. The simulations showed that, when performing a 48 # grain size cut, the mass loss in relation to the initial mass of the sample would be 66,5 % and an increase of 4,2 % in the ash content could be achieved, while for the 65 # cut, these parameters would be 78,2 % and 7,1 %, respectively. The best flotation results were obtained with the -65 # fraction and the best reagent condition was obtained using diesel oil (420 - 900 g.t⁻¹) and pine oil (105 - 225 g.t⁻¹), making it possible to recover between 74 - 94 % of the carbonaceous matter contained in the material and with mineral matter contents of approximately 17 - 32 %, suitable for blending or as a final product. The study continues, evaluating operational parameters and other flotation flowcharts circuit alternatives.

Key-Words: Coal Tailing. Characterization. Flotation.

1 INTRODUÇÃO

A mineração de carvão é responsável pela geração de uma grande quantidade de rejeitos, alguns com potencial poluidor. Grande parte desse material é constituída por partículas finas e ultrafinas que acabam por serem dispostas em barragens de rejeito podendo conter considerável quantidade de matéria carbonosa com potencial de ser reaproveitada. Além disso, a crescente necessidade de reaproveitamento dos recursos e conscientização ambiental também vem impulsionando estudos para a redução da quantidade de rejeitos que são produzidos na indústria carbonífera (AMARAL FILHO, 2014).

Dessa forma, o aproveitamento de rejeitos tem se mostrado uma alternativa promissora no que diz respeito à economia e ao meio ambiente, reduzindo custos ambientais e agregando valor a um material que era tido como rejeito (AMARAL FILHO, 2014). Estudos mostram a aplicabilidade de rejeitos de carvão como agregado na produção de blocos de concreto para pavimentação (SANTOS *et al.*, 2013) e na fabricação de solos (FIRPO *et al.*, 2015). Sobre a perspectiva de beneficiamento mineral de rejeitos de carvão, Englert e Rubio (2011) destacam duas principais vantagens: a minimização da formação de pilhas e barragens de rejeitos com consequente diminuição da geração de drenagem ácida de minas (DAM's) e a geração de novos concentrados de carvão com teores compatíveis com as especificações do mercado. Brum *et al.* (2015) ainda afirmam que o reaproveitamento dos rejeitos pode aumentar a vida útil das barragens, já que diminui a quantidade de material descartado.

Em relação às técnicas empregadas nesse tipo de reprocessamento de carvão, estudos mostram que a flotação tem se mostrado uma alternativa eficiente para a recuperação de matéria carbonosa residual de rejeitos. Ruiz Nieves e Chaves (2009) mostraram que o conteúdo de matéria carbonosa presentes na barragem de rejeitos de El Cantor, Colômbia, pode ser recuperado via flotação com reagentes comumente empregados nas usinas. Jannesar Malakooti *et al.* (2012) realizaram estudos de flotação com rejeitos de carvão mineral provenientes da usina de Central Alborz (norte do Irã), onde foi possível atingir teores de cinzas inferiores a 11 %.

No presente trabalho, o objetivo foi caracterizar e definir alternativas para a concentração de matéria carbonosa residual em rejeitos de carvão através da flotação. A amostra utilizada nos ensaios é proveniente da jazida de carvão de Moatize (Bacia Carbonífera de Moatize), localizada na província de Tete, Moçambique. Essa região do país é considerada uma das mais ricas bacias de carvão do mundo, com reservas estimadas em aproximadamente 2,5 bilhões de toneladas (JOSÉ; SAMPAIO, 2011). Um desafio da região é aumentar a produção atual.

2 EXPERIMENTAL

2.1 PREPARO DA AMOSTRA

A amostra utilizada foi composta pelos rejeitos finos de carvão provenientes dos circuitos das espirais concentradoras e da flotação.

Os rejeitos foram secos à temperatura ambiente, homogeneizados e quarteados de acordo com o método da pilha alongada. Após, foi utilizado o método de pilha cônica e quarteador Jones visando à obtenção de alíquotas para a determinação da distribuição granulométrica e densidade.

Para os estudos de flotação, alíquotas do material foram peneiradas a seco em peneiras quadradas de 50x50 cm, com malhas de 48 e 65 #, e o material passante foi utilizado como alimentação dos estudos de flotação.

2.2 DETERMINAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS E DENSIDADE

As análises granulométricas foram realizadas a úmido em peneiras de laboratório de 20 cm de diâmetro e 5 cm de altura, com as seguintes malhas: 18 # (1000 µm), 35 # (417 µm), 48 # (325 µm), 65 # (212 µm), 100 # (150 µm), 200 # (75 µm) e 325 # (45 µm). O produto retido em cada peneira foi seco em estufa à temperatura de 50 °C por 24 h e submetido, posteriormente, às análises de cinzas.

A densidade foi determinada por picnometria a hélio.

2.3 ANÁLISE DE MATÉRIA MINERAL (CINZAS)

As análises de cinzas foram realizadas em duplicata segundo o procedimento da norma ASTM D-3174. O teor de cinzas foi determinado, conforme a Eq. 01:

$$\% \text{Czbu} = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100 \quad [\text{Eq. 01}]$$

onde:

% Czbu = percentual de cinzas base úmida;

m₁ = massa do cadinho + cinzas;

m₂ = massa do cadinho vazio;

m = massa da amostra.

2.4 ESTUDOS DE FLOTAÇÃO EM CÉLULA MECÂNICA

Os ensaios de flotação foram realizados em célula mecânica, marca Darma-Denver, modelo D12 (2 L), com polpas contendo 10 % p/p, sob agitação (1000 rpm) e pH natural. Foram utilizados os reagentes: Betacol (reagente comercial constituído por 70 % de querosene e 30 % de espumante), óleo diesel (coletor) e óleo de pinho (espumante), comumente empregados na flotação de carvão. O ensaio de flotação foi iniciado com a injeção de ar na célula à vazão de 5 L.min⁻¹ (1 - 2 min) e 6 L.min⁻¹ (3 min), controlada por rotâmetro. A coleta foi feita com auxílio de raspador manual em intervalos de tempo de 1 minuto, totalizando 3 min de flotação. O volume de polpa na célula foi mantido constante, com a injeção de água com pH natural.

Foram avaliadas as granulometrias da alimentação (-48 # e -65 #) e a concentração de reagentes, conforme Tabela 1. A exploração da melhor condição de dosagem de óleo diesel e de pinho foi realizada com o óleo diesel emulsificado. A condição em que se obteve maior recuperação de matéria carbonosa foi replicada usando-se óleo diesel *in natura* para fins de análise do efeito da emulsificação.

Tabela 1 - Condições de reagentes utilizados nos estudos de flotação

Reagentes	Concentrações (g.t ⁻¹)	Condicionamento (min)
Betacol	500	3
	600	
	700	
Óleo Diesel	420	1

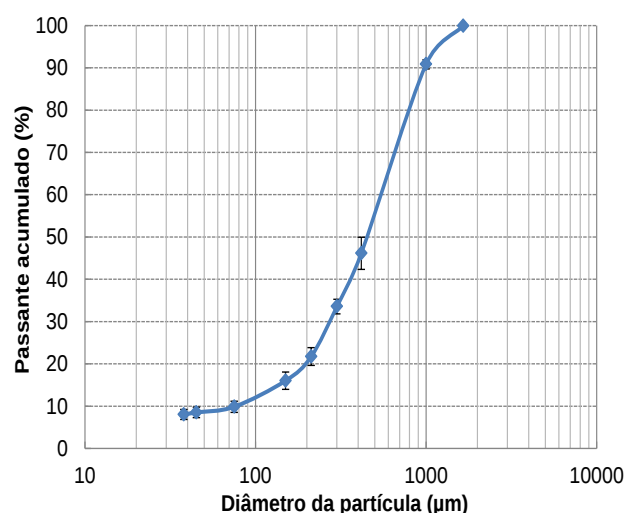
Óleo de Pinho	105	0,5
Óleo Diesel	600	1
Óleo de Pinho	150	0,5
Óleo Diesel	900	1
Óleo de Pinho	225	0,5

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ESTUDOS DE CARACTERIZAÇÃO

A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica média da amostra realizada por peneiramento a úmido.

Figura 1 - Distribuição granulométrica da amostra composta pelos rejeitos finos de carvão provenientes dos circuitos das espirais concentradoras e da flotação.

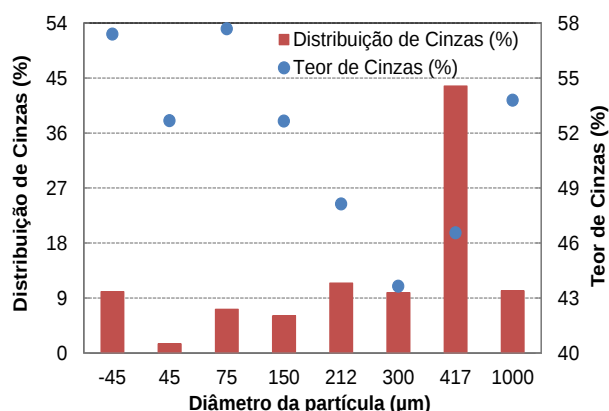


A distribuição mostra um *top size* de 1650 µm, e diâmetro médio (d₅₀) de 470 µm. Apesar de denominada “rejeito fino”, a amostra apresenta granulometria grossa, sendo necessária sua adequação para estudos de flotação, através de corte granulométrico, ou ainda, remoagem.

A densidade da amostra foi determinada como sendo 1,94 g.cm⁻³.

Apesar de os maiores teores de cinzas (~58 %) terem sido observados nas frações -45 e +75 µm, a maior distribuição (~44 %) ocorre na fração +417 µm (Figura 2). Isso ocorre devido à elevada massa retida (~46 %) nessa fração (+417 µm).

Figura 2 - Distribuição e teores de cinzas por faixa granulométrica da amostra composta pelos rejeitos finos de carvão provenientes dos circuitos das espirais concentradoras e da flotação.



3.2 SIMULAÇÃO DE CORTES GRANULOMÉTRICOS

Através das distribuições granulométricas e de cinzas foi possível simular cortes de frações de tamanho, recalculando os teores e massas dos possíveis produtos gerados nessa etapa, além de produzir uma alimentação a um provável reprocessamento (flotação, por exemplo) dessa amostra.

Realizando um corte granulométrico das frações mais grossas dessa amostra (+18 #, +35 #, +48 #, e +65 #) poderia ser obtido um acréscimo de até 7,1 % do teor de cinzas com uma perda de massa nesse processo de até 78 % (Tabela 2).

Tabela 2 – Previsão de perda mássica e teores dos produtos após corte granulométrico

Cortes	Perda Mássica (%)	Teor Cinzas (%)
Rejeito Fino	0,0	49,4
+35 # (+417 μm)	55,4	51,1
+48 # (+300 μm)	66,5	53,6
+65 # (+212 μm)	78,2	56,5
-325 # (-44 μm)	8,6	48,5
-325 # e +35 #	64,0	49,6

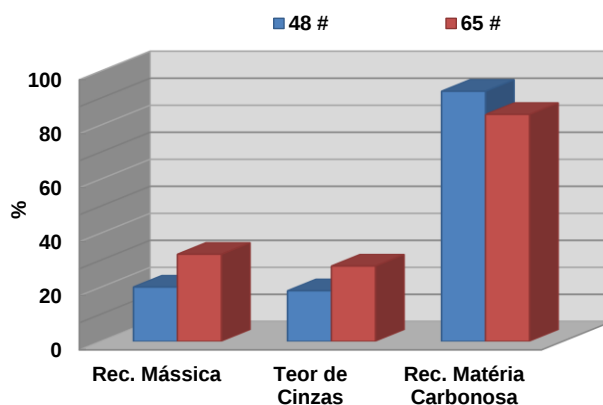
Um corte de finos (-325 #) e de grossos (+35 #) acarretaria uma perda mássica de 64 % e o produto resultaria em teores muito similares ao rejeito fino inicial, ou seja, somente teria suas características granulométricas modificadas. Além disso, a retirada dessas partículas mais finas e

grossas do sistema poderia beneficiar o processo aplicado posteriormente (flotação).

3.3 ESTUDOS DE FLOTAÇÃO

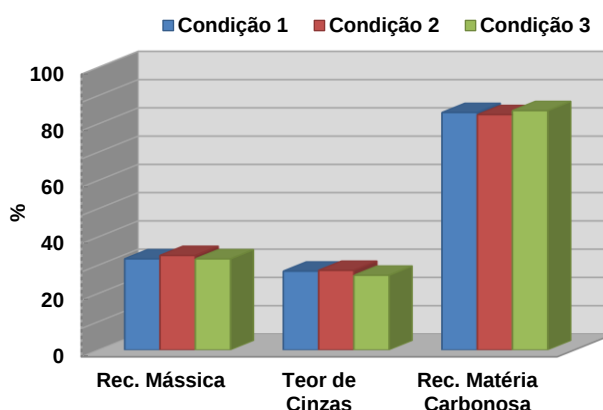
Os resultados dos estudos de flotação das frações -48 # e -65 #, representados na Figura 3, evidenciam que a fração -65 # apresentou maior recuperação mássica, sendo a amostra selecionada como a granulometria a ser utilizada para as demais condições testadas.

Figura 3 - Efeito da granulometria da alimentação da flotação sobre as recuperações e teores de cinzas. Condições: Granulometrias = -48 e -65 #; [Betacol] = 700 g.t⁻¹.



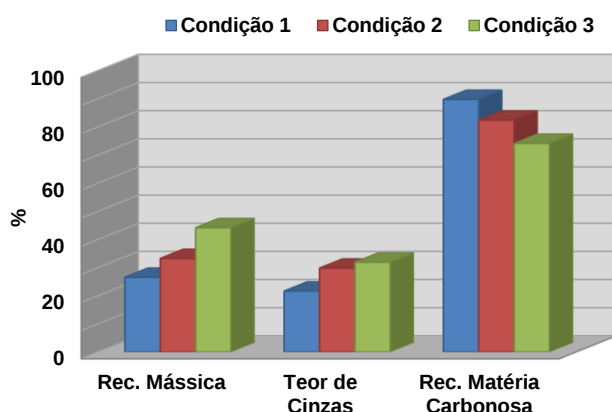
As diferentes concentrações de Betacol (500-700 g.t⁻¹) estudadas apresentaram resultados de recuperações e teores muito similares, conforme Figura 4.

Figura 4 - Efeito da concentração de Betacol sobre as recuperações e teores de cinzas. Condições: Granulometria = -65 #; [Betacol]: Condição 1 = 500 g.t⁻¹; Condição 2 = 600 g.t⁻¹; Condição 3 = 700 g.t⁻¹.



Nos ensaios usando óleo diesel emulsificado e óleo de pinho, a melhor condição foi a de 420 g.t⁻¹ de óleo diesel e 105 g.t⁻¹ de óleo de pinho, pois foram atingidas recuperações de matéria carbonosa de aproximadamente 90 % (Figura 5).

Figura 5 - Efeito da concentração de óleo diesel emulsificado e óleo de pinho sobre as recuperações e teores de cinzas. Condições: Granulometria = -65 #; [Óleo diesel e Óleo de pinho]: Condição 1 = 420 e 105 g.t⁻¹; Condição 2 = 600 e 150 g.t⁻¹; Condição 3 = 900 e 225 g.t⁻¹.



Ao replicar essa dosagem, porém sem emulsificar o óleo diesel, foi observado que a cinética de flotação foi reduzida, fato já verificado por Rubio *et al.* (2007), na flotação de cobre e molibdênio. Segundo o autor, a adição de óleo diesel não emulsificado apresentou zona de espuma mais espessa (densa e menor) em comparação com os estudos *standard* e com adição de óleo diesel emulsificado, principalmente no primeiro minuto, impedindo o início do transbordo do concentrado e diminuindo significativamente a cinética de flotação.

No presente estudo, a Tabela 3 mostra que as diferenças de recuperações e teores de cinzas

foram expressivas em todas as coletas, principalmente na do segundo minuto, onde a recuperação mássica com a utilização de óleo diesel emulsificado foi 5 vezes a obtida no ensaio com óleo diesel *in natura*.

A queda na recuperação mássica e no teor de cinzas global, ao se utilizar óleo diesel não emulsificado, foi significativa, aproximadamente 9 e 4 %, respectivamente, resultando em um aumento de cerca de 5 % na recuperação de matéria carbonosa.

A especificação de teor de cinzas para a venda de carvão térmico estimada nesse trabalho foi de 25 %. Dessa forma, ambas as condições usando 420 g.t⁻¹ de óleo diesel e 105 g.t⁻¹ de óleo de pinho permitiram obter produto final com teor de cinzas adequado para a comercialização. O estudo das demais dosagens destes reagentes evidenciou a possibilidade de obtenção de concentrado para *blending*. As recuperações mássicas obtidas nesses casos foram superiores e implicam em menor quantidade de material a ser disposto como rejeito final. A escolha da melhor alternativa deve considerar aspectos técnicos, econômicos e ambientais (preço do produto final, custo para deposição de rejeitos, vida útil de barragens, etc).

4 CONCLUSÕES

A amostra utilizada nos estudos, embora seja denominada "rejeito fino", apresentou granulometria grossa sendo necessária sua adequação para os estudos posteriores. Os melhores resultados na flotação foram obtidos com a fração -65 #, que representa 22 % da massa inicial da amostra. Os tradicionais reagentes empregados na flotação de carvão e de custos menores que de um reagente comercial, óleo diesel emulsificado e de pinho, foram mais eficientes na recuperação da matéria

Tabela 3 - Recuperações e teores de cinzas por coleta do ensaio de flotação utilizando óleo diesel emulsificado e não emulsificado

Tempo (min)	Óleo diesel emulsificado			Óleo diesel não emulsificado		
	Rec. Mássica (%)	Teor de cinzas (%)	Rec. Matéria Carbonosa (%)	Rec. Mássica (%)	Teor de cinzas (%)	Rec. Matéria Carbonosa (%)
1	2,4	12,2	99,5	0,7	10,7	99,9
2	15,9	18,5	94,7	3,0	11,3	99,4
3	8,4	30,3	95,5	13,9	18,9	95,2
Global	26,5	21,6	89,7	17,6	17,2	94,4

carbonosa residual contida no rejeito que o reagente comercial Betacol. As dosagens avaliadas permitiram recuperar entre 74 e 94 % da matéria carbonosa contida com teores da matéria mineral variando entre 17 e 32 %, gerando concentrados compatíveis para *blending*, ou como produto final. O estudo continua, avaliando parâmetros operacionais e outros fluxogramas de flotação.

5 REFERÊNCIAS

- AMARAL FILHO, Juarez Ramos do. **Aproveitamento de rejeitos de carvão em Santa Catarina, Brasil**. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- BRUM, Irineu Antônio Schadach de et al. **Flotação de lodos do beneficiamento de carvão para recuperação de matéria carbonosa**. In: XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2015, Poços de Caldas. Livro de Anais XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2015. v. 2. p. 529-538.
- ENGLERT, Alexandre; RUBIO, Jorge. **Beneficiation of pyrite-rich tailings from coal jig processing by aqueous elutriation**. Procemin 2011 – 8th International Mineral Processing Seminar, Santiago, Chile. Proceedings, p.418-426, 2011.
- FIRPO, Beatriz Alicia; DO AMARAL FILHO, Juarez Ramos; SCHNEIDER, Ivo André Homrich. **A brief procedure to fabricate soils from coal mine wastes based on mineral processing, agricultural, and environmental concepts**. Minerals Engineering, v. 76, p. 81-86, 2015.
- JANNESAR MALAKOOTI, Sajjad et al. **Coal Recycling from Tailings using Flotation with 2-Level Experimental Design Techniques**. Int. Journal of Mining & Geo-Engineering, v. 46, n. 1, p. 1-13, 2012.
- JOSÉ, David Selemene; SAMPAIO, Carlos Hoffmann. **Estado da Arte da Mineração em Moçambique: Caso. Carvão de Moatize, Tete**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Porto Alegre, Brasil, 2011.
- RUBIO, Jorge. et al. **Enhanced flotation of sulfide fines using the emulsified oil extender technique**. International Journal of Mineral Processing, v. 84, p. 41-50, 2007.
- RUIZ NIEVES, Astrid Sofia; CHAVES, Arthur Pinto. **Flotação do carvão contido em um rejeito carbonoso**. Rem: Revista Escola de Minas, v. 62, n. 3, p. 315-322, 2009.
- SANTOS, Cassiano Rossi dos et al. **Use of coal waste as fine aggregates in concrete paving blocks**. Geomaterials, v. 3, p.54-59, 2013.