

### **III-405 - PRODUÇÃO DE COAGULANTE FÉRRICO A PARTIR DA PIRITA PRESENTE EM REJEITO DE CARVÃO MINERAL – ESTUDO EM ESCALA PILOTO**

**Angéli Viviani Colling** <sup>(1)</sup>

Doutoranda pelo PPGE3M, Escola de Engenharia, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil.

**Renan Fernando Tresoldi Thiesen** <sup>(2)</sup>

Graduando em Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil.

**Jean Carlo Salomé dos Santos Menezes** <sup>(3)</sup>

Professor Dr., Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, UNOESC, Videira. SC, Brasil

**Ivo Andre Homrich Schneider** <sup>(4)</sup>

Professor Dr. LTM-DEMIN/PPGE3M, Escola de Engenharia UFRGS. Porto Alegre, **RS**, Brasil.

**Endereço** <sup>(4)</sup>: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, LTM-DEMIN-PPGE3M, Av. Bento Gonçalves 9500, Bloco IV, Porto Alegre, RS - CEP 91501-970 – Brasil - Tel: 0xx (51)3308-9946. E-mail: ivo.andre@ufrgs.br

#### **RESUMO**

Devido à associação com matéria mineral, os carvões brasileiros precisam passar por um processo de beneficiamento, gerando um rejeito rico em rochas sedimentares (siltitos e folhelhos) e sulfeto de ferro (na forma de pirita –  $\text{FeS}_2$ ). Uma possível alternativa de evitar danos ambientais é o processamento hidrometalúrgico da pirita para a produção de sulfato férrico, um reagente amplamente empregado no tratamento de águas. O rejeito de carvão (com valores de até 15% de pirita) pode ser beneficiado gravimetricamente para se obter um concentrado contendo 60 % a 70 % de pirita. O processo de produção de sulfato férrico ocorre pela oxidação da pirita na presença de água, oxigênio e bactéria acidofílicas. Estudos neste sentido já foram conduzidos em escala de laboratório, demonstrando sua viabilidade. Assim, o objetivo do presente trabalho foi projetar e implantar uma planta piloto para o processamento biohidrometalúrgico da pirita. A metodologia do trabalho consistiu no processamento de 300 kg de rejeito de carvão em uma pilha submetida a processo de recirculação de água. A água lixiviada foi monitorada em relação ao teor de ferro (total,  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ ), sulfatos e concentração de bactérias acidofílicas *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Os resultados demonstram que, após 09 semanas, foi possível obter 500L de uma solução de sulfato férrico com 24 g/L de Fe (praticamente 100% na forma  $\text{Fe}^{3+}$ ). Assim, após evaporação, é possível produzir aproximadamente 190L de coagulante com 12 % de Fe por tonelada mês. Isso permite concluir que seria necessário processar 3.200 t de concentrado de pirita para abastecer com água tratada uma cidade com porte de 200.000 habitantes, como Criciúma.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biolixiviação, Carvão Mineral, Coagulante Férrico, Drenagem Ácida de Minas, Pirita.

#### **INTRODUÇÃO**

Os recursos identificados de carvão mineral no Brasil estão na ordem de 32 bilhões de toneladas, localizados na Região Sul do país, nos Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Os locais de maior exploração são Candiota (RS), região do Baixo Jacuí (RS) e Região Carbonífera do Sul Catarinense (SC) (DNPM, 2001).

Devido à associação com matéria mineral, os carvões brasileiros precisam passar por um processo de beneficiamento, gerando um rejeito rico em rochas sedimentares (siltitos e folhelhos) e sulfeto de ferro (presente na forma de pirita –  $\text{FeS}_2$ ) (Rubio, 1988). Cerca de 50% a 70% do material minerado é considerado rejeito. Dessa maneira, são geradas, anualmente, milhões de toneladas de rejeitos contendo, dentre outros minerais, a pirita. Em sua grande maioria, esses rejeitos são dispostos no meio ambiente de forma inadequada, fazendo com que os mesmos estejam propensos à geração da drenagem ácida de minas (DAM) (Monteiro, 2004, Soares et al, 2008).

A DAM se forma a partir da oxidação da pirita na presença do oxigênio do ar e da água da chuva. A oxidação desse mineral reduz drasticamente o pH do ambiente e provoca a lixiviação do ferro presente na pirita e dos demais metais que se encontram no rejeito. Esse processo dá origem a uma solução de baixo pH, rica em metais solubilizados (Fe, Al, Mn e Zn) e que contamina corpos d'água superficiais e subterrâneos, com graves impactos ambientais associados (Kontopoulos, 1998).

Uma possível alternativa para reduzir os danos ambientais é o processamento mineral dos rejeitos de carvão de forma a separar e concentrar pirita. De modo geral, a concentração de pirita nos módulos de rejeitos varia de 5 a 15% de FeS<sub>2</sub>. Contudo, esse material pode ser processado gravimetricamente (por exemplo em jigues, com uma densidade de corte de aproximadamente 2,8) para a concentração da pirita e chegar a um produto contendo 60 a 70% de pirita (Amaral Filho, 2011). Esse concentrado de pirita pode ser empregado na produção de reagentes químicos, como o ácido sulfúrico, sulfato ferroso e o sulfato férrico, sendo este último o foco do presente trabalho.

Por outro lado, a sociedade moderna necessita de grandes volumes de água tratada. A coagulação é uma operação de tratamento físico-químico largamente aplicada no tratamento de águas de abastecimento público e de efluentes industriais. O consumo brasileiro de coagulantes é estimado em 1 milhão de toneladas ano (Furtado, 2008). Os principais reagentes empregados são o sulfato de alumínio, o cloreto de alumínio, o sulfato férrico e o cloreto férrico; ou suas formas parcialmente hidrolisadas, o poli-sulfato de alumínio, o poli-cloreto de alumínio, o poli-sulfato férrico e o poli-cloreto férrico (Tchobanoglous, 2003; Bratby, 2006). O reagente mais aplicado é o sulfato de alumínio, principalmente devido ao menor custo. A sua produção é feita a partir da reação da bauxita (minério cujo principal componente é o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) com ácido sulfúrico (ABIQUIM, 2006).

Contudo, atualmente, há uma tendência de substituição dos sais de alumínio pelos sais de ferro como agentes coagulantes. O alumínio está sendo relacionado a algumas doenças neurológicas, incluindo o mal de Alzheimer (Walton 2006; Becaria et al, 2006). Ainda, os sais de ferro apresentam-se eficientes em uma faixa de pH mais ampla (Furtado, 2008). Como o cloreto férrico é altamente corrosivo, o sulfato férrico surge como uma boa opção. Atualmente, o sulfato férrico é, em sua maioria, produzido pela dissolução de sucata ferrosa em ácido sulfúrico. A sua produção é feita pelo ataque de sucata metálica com ácido sulfúrico, técnica que exige elevados investimentos em reagentes químicos (Tchobanoglous, 2003; Bratby, 2006). Nesse processo, caso haja a falta de cuidado na seleção da sucata, pode haver a produção de reagentes contaminados com metais indesejados, tais como cádmio, chumbo, cobre, cromo, manganês, níquel e zinco.

Neste contexto, o grupo de pesquisa está desenvolvendo uma rota inovadora de produção de sulfato férrico, que ocorre pelo processamento biohidrometalúrgico da pirita na presença de água, oxigênio e bactérias acidofílicas. A grande vantagem é que nenhum insumo químico é necessário no processo. Estudos neste sentido já foram conduzidos em escala de laboratório, demonstrando sua viabilidade (Colling, et al, 2011). Todavia, estudos em maior escala são necessários para obtenção de parâmetros operacionais.

Assim, o objetivo do presente trabalho foi projetar, implantar e operar uma planta piloto para o processamento biohidrometalúrgico da pirita para a produção do coagulante sulfato férrico. Nesta planta foram processados 300 kg de rejeito de carvão em uma pilha onde foi recirculada água durante um período de nove semanas. A água lixiviada foi monitorada em relação ao teor de ferro (total, Fe<sup>2+</sup> e Fe<sup>3+</sup>), sulfatos e concentração de bactérias acidofílicas *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

## REAÇÕES ENVOLVIDAS

- A pirita, na presença de oxigênio atmosférico e água, se oxida pelo mecanismo direto (Kontopoulos, 1998):



A reação (1) produz íons H<sup>+</sup>. Porém, se o potencial de oxidação for mantido, a oxidação do íon Fe<sup>2+</sup> para Fe<sup>3+</sup> ocorrerá, consumindo parte dos íons H<sup>+</sup>:



A reação (2) ocorre abioticamente em valores de pH mais elevados (acima de 4,5) e diminui à medida que o pH decresce. A reação pode ser acelerada pela ação de bactérias quimiolitotróficas acidófilas do gênero *Acidithiobacillus* (Johnson e Hallberg, 2003). Essas bactérias catalisam a reação (2), que pode ser acelerada em até  $1 \times 10^6$  vezes.

O  $\text{Fe}^{3+}$ , gerado na reação (2), também oxida a pirita ( $\text{FeS}_2$ ), dando origem ao mecanismo indireto de oxidação da pirita:



O ferro gerado na reação (3) é transformado em  $\text{Fe}^{3+}$  conforme a reação (2). Assim, o processo de degradação da pirita entra em um ciclo (reações 2 e 3) que só terminará com o consumo total da pirita do meio. Neste processo, os produtos gerados são basicamente  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  dissolvidos em água, ou seja, uma solução aquosa de sulfato férrico.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Rejeito de Carvão

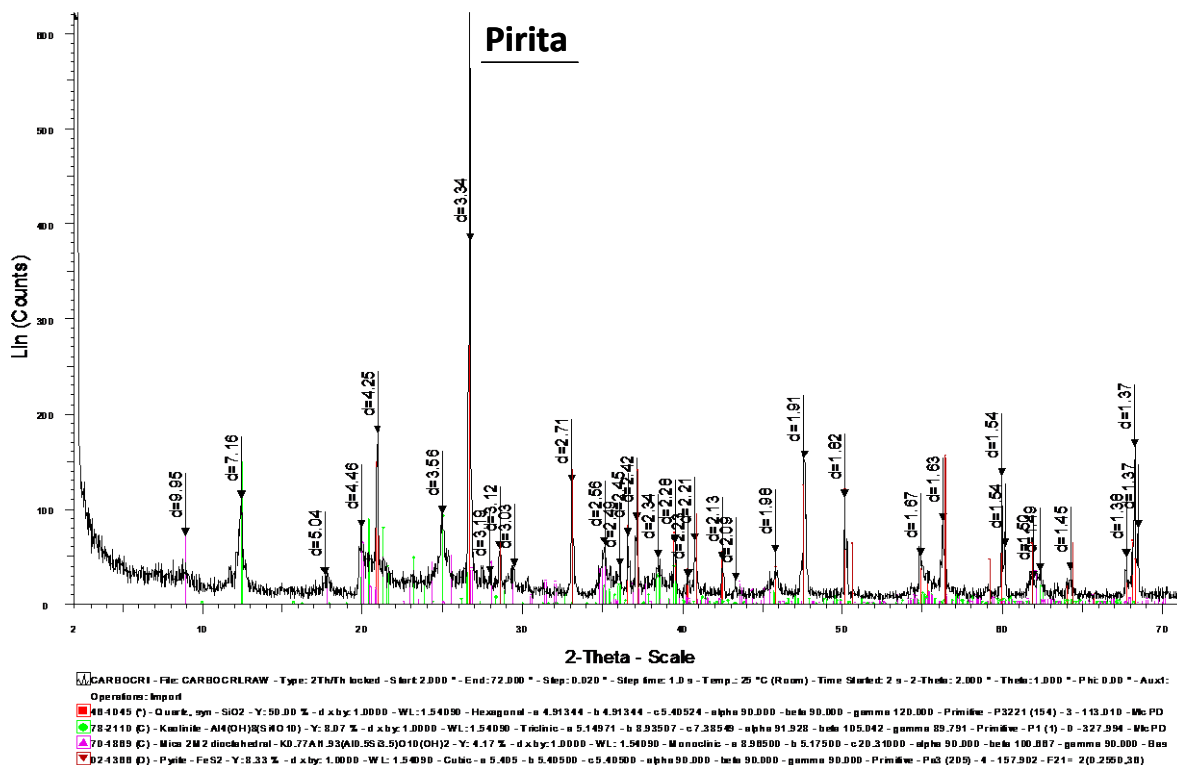
A amostra de rejeito de carvão foi fornecida por uma empresa que fica situada no Município de Forquilha, região carbonífera do Estado de Santa Catarina que explora a Camada Barro Branco. O rejeito de carvão passou inicialmente pelo processo de re-beneficiamento por jigagem para a obtenção do concentrado de pirita. Após o processo de jigagem, o material foi disposto no pátio industrial em uma pilha longitudinal. Nesta pilha foi coletada uma amostra, a qual foi encaminhada ao laboratório. A amostragem foi efetuada usando os procedimentos recomendados na NBR 10.007 (ABNT, 2004). No laboratório da UFRGS as amostras foram secadas, cominuídas e quarteadas. Foram coletadas alíquotas para a caracterização do material e o restante foi armazenado em recipientes de polietileno de alta densidade (PEAD) para posterior uso nos experimentos. A granulometria do material variava entre 2 e 50 mm.

A composição do concentrado de pirita é apresentada na Tabela 1. Pode-se observar que o material apresenta 37,3% de enxofre total, sendo que 36,4% são de enxofre pirítico e 0,9% enxofre sulfático. Assim, o teor de pirita na amostra foi calculado em aproximadamente 70%, sendo este o composto cristalino majoritário, conforme análise de difração de raios-x apresentada na Figura 1.

**Tabela 1: Composição do concentrado de pirita.**

PARÂMETROS	CONCENTRADO DE PIRITA
Carbono fixo, %	13,7
Cinzas, %	59,9
Materiais voláteis, %	22,7
Umidade higroscópica, %	3,7
Enxofre sulfático, %	0,9
Enxofre pirítico, %	36,4
Enxofre orgânico, %	ND*
Enxofre total, %	37,3

\*ND=Não detectado.



**Figura 1: Análise de difração de raios-x do rejeito de carvão.**

É importante verificar que não foram detectadas concentrações significativas de metais e de elementos tóxicos, como mercúrio (Hg), arsênio (As), chumbo (Pb), cromo (Cr) e cádmio (Cd), que poderiam comprometer a viabilidade da geração de produtos a partir do rejeito.

### Planta Piloto

A planta piloto de biolixiviação foi construída na UFRGS, ocupando uma área de 3 m<sup>2</sup> (Figura 2). Foi utilizado o modelo de biolixiviação em pilha com dois reservatórios de capacidade de 0,5 m<sup>3</sup>. Um deles foi utilizado como recipiente do rejeito e o outro reservatório contendo a solução concentrada de ferro. As partes integrantes do sistema estão descritas abaixo:

- Difusor: chuveiro de PVC com diâmetro de 30 cm.
- Pilha de biolixiviação: reservatório com capacidade de 0,5 m<sup>3</sup>.
- Bomba de recirculação: bomba submersa Sarlo modelo SB 2000 resistente à acidez do meio.
- Recipiente do lixiviado: reservatório com capacidade de 0,5 m<sup>3</sup> foi utilizado como depósito do concentrado.
- Sistema de recirculação: mangueira flexível de látex, difusor e bomba de recirculação.



**Figura 2: Planta piloto para biolixiviação da pirita no Campus da UFRGS.**

O funcionamento da planta se dá por meio da recirculação direta da solução do reservatório inferior para o reservatório superior. Esta passa pela pilha de biolixiviação e retorna para o reservatório inferior passando por um sistema de retenção de partículas suspensas. A recirculação ocorre por ação de uma bomba colocada no reservatório inferior. A solução de início do processo foi 300 L de uma água oriunda das valas intermediárias das pilhas de rejeito e originária de precipitação pluviométrica, chamada de EDR4. O uso da EDR4 como água de circulação no processo foi realizado pela disponibilidade deste efluente no pátio industrial. Esta iniciativa foi motivada pela idéia de reaproveitamento da água da chuva. As características desta água são apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2. Características da água de re-circulação utilizada na planta piloto.**

PARÂMETROS	ÁGUA DE RE-CIRCULAÇÃO (EDR4)
pH	2,9
Fe Total, mg.L <sup>-1</sup>	110,5
Al, mg.L <sup>-1</sup>	28,49
Ca, mg.L <sup>-1</sup>	290
Mn, mg.L <sup>-1</sup>	7,6
Cl <sup>-</sup> , mg.L <sup>-1</sup>	378
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> , g.L <sup>-1</sup>	18,5
<i>A. ferrooxidans</i> , NMP:100 mL	10 <sup>2</sup>

Com a finalidade de proporcionar melhores condições para o crescimento da comunidade bacteriana responsável pela oxidação da pirita, foram adicionados os seguintes nutrientes: 0,9kg de sulfato de amônio (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 150g de fosfato hidrogeno de dipotássio K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>; 150g de sulfato de magnésio MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O; 30g de cloreto de potássio KCl. A fonte de inóculo bacteriano foi uma drenagem ácida do módulo B preparada em laboratório em meio “9K”.

O processo foi mantido em operação durante nove semanas, com coletas e análises semanais do lixiviado. O lixiviado foi analisado quanto ao teor de ferro (total, Fe<sup>3+</sup> e Fe<sup>2+</sup>), de sulfatos, pH, Eh (eletrodo de prata/cloreto de prata), condutividade e também quanto ao número de bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans*, este último realizado através da técnica de número mais provável (NMP). Todas essas análises seguiram os procedimentos descritos no “Standard Methods for Examination of Water and Wastewater” (APHA, 2005). Também foi realizada análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV), que mostra imagens das bactérias aderidas ao rejeito de carvão.

### **Produção do Coagulante**

Com o objetivo de alcançar concentração de ferro similar ao reagente sulfato férrico comercial, as amostras obtidas do concentrado de ferro foram evaporadas até a concentração de 12% após o ciclo de nove semanas de lixiviação.

Com a finalidade de purificar o reagente obtido antes da evaporação, realizou-se uma filtração em membrana de 0,45µm auxiliada por uma bomba à vácuo. A evaporação foi conduzida lentamente em uma chapa de aquecimento em banho-maria em temperatura de 30-35°C. As análises realizadas com o coagulante evaporado foram: ferro total, alumínio, manganês, zinco, cálcio, sulfatos e carbono orgânico total. Todas essas análises seguiram os procedimentos descritos no “Standard Methods for Examination of Water and Wastewater” (APHA, 2005).

### **Estudos de Tratamento de Água**

O coagulante obtido foi utilizado para o tratamento de água do Lago Guaíba para fins de abastecimento público de Porto Alegre-RS. Esse experimento foi conduzido em "Jar Test" de forma comparativa com um reagente comercial de sulfato férrico. As concentrações de coagulantes utilizadas foram determinadas experimentalmente por ensaio de “Jar Test” preliminares à realização dos experimentos.

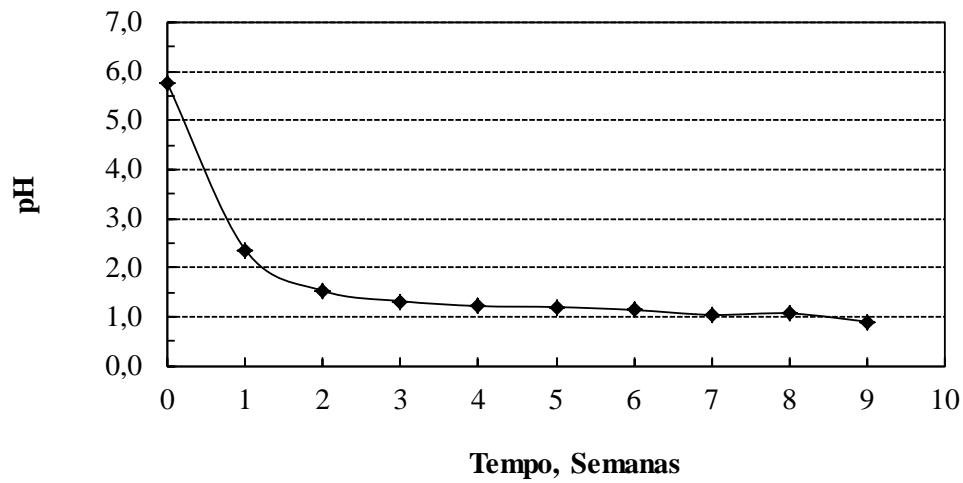
O tratamento de água de abastecimento público, realizado em equipamento do tipo "Jar Test", seguiu o seguinte procedimento:

- (a) coleta da amostra de água no dia de realização dos testes;
- (b) adição de uma quantidade de coagulante de 24 mg/L de Fe+Al em 2 L de água e agitação do meio a 100 RPM por 5 minutos;
- (c) ajuste do pH da amostra para 6,5 sob agitação;
- (d) etapa de agitação lenta a 20 RPM por 3 minutos visando à agregação dos coágulos produzidos;
- (e) decantação do efluente tratado por 1 hora;
- (f) coleta do clarificado e conservação da amostra para análise.

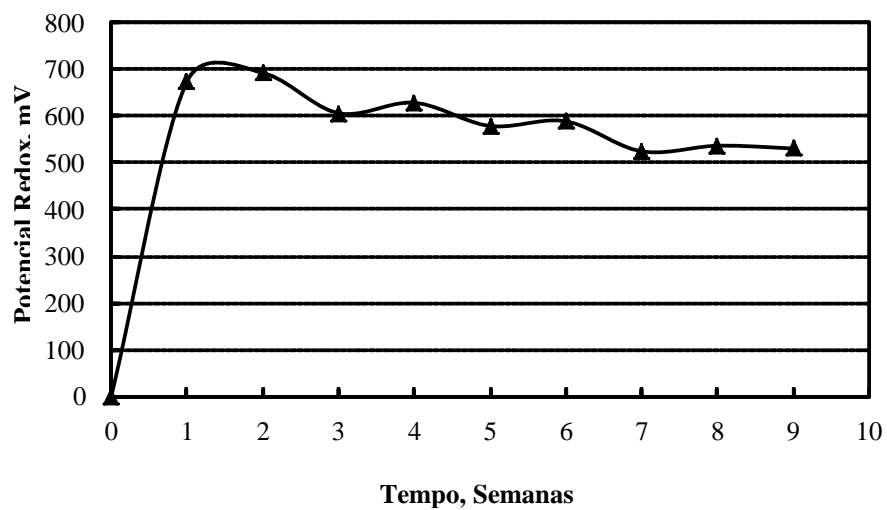
A água bruta e clarificada foi analisada em relação aos seguintes parâmetros: pH, sólidos suspensos, turbidez, cor, Al, As, Cd, Cu, Cr, Fe, Hg, Mn, Na, Pb, Se, Zn, Cl<sup>-</sup>, NO<sup>2-</sup>, NO<sup>3-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, surfactantes e dureza. Todas essas análises seguiram os procedimentos descritos no “Standard Methods for Examination of Water and Wastewater” (APHA, 2005) e os resultados foram comparados com os valores exigidos na Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde para água potável.

### **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A Figura 3 mostra os resultados do acompanhamento semanal do pH do processo de biolixiviação ao longo das nove semanas em escala piloto. Pode-se observar que houve uma grande redução do pH, mais marcante nas 2 semanas iniciais. O valor do pH, da segunda semana até a nona, foi baixando gradualmente de 1,5 a 1,0. Em relação ao potencial redox (Figura 4), houve um aumento significativo principalmente a partir da segunda semana, estabilizando-se entre 500 e 700 mV, mostrando o caráter oxidante do meio.



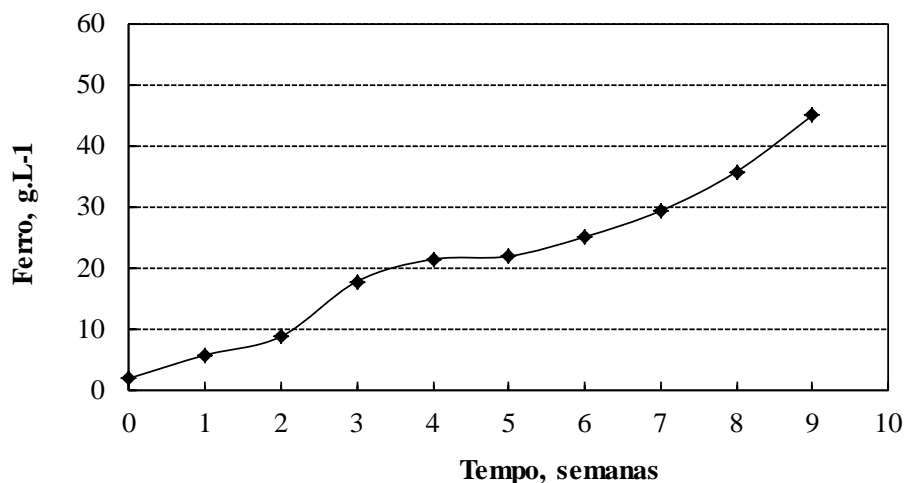
**Figura 3: pH do lixiviado na planta piloto em função tempo.**



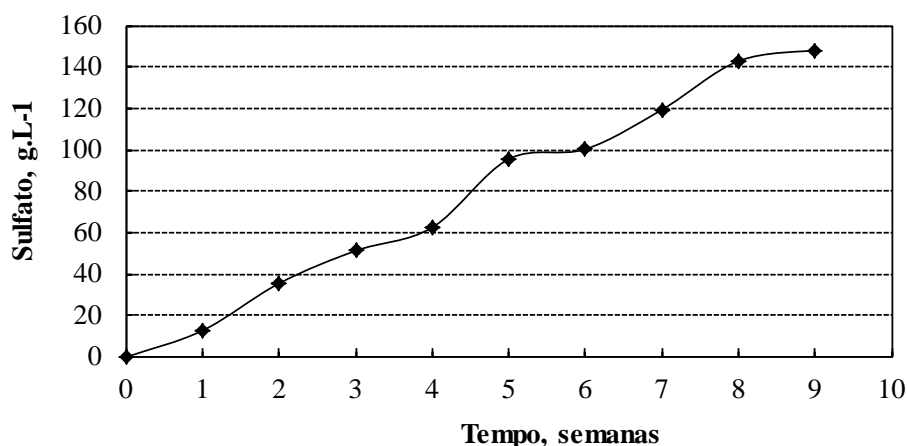
**Figura 4: Potencial Redox, em mV (eletrodo de prata/cloreto de prata), na planta piloto em função tempo.**



As Figuras 5 e 6 mostram, respectivamente, as concentrações de ferro total e sulfato na água de lixiviação no decorrer das nove semanas. Estes gráficos demonstram o aumento da oxidação da pirita com o decorrer do tempo, com a conseqüente solubilização do ferro e sulfato.



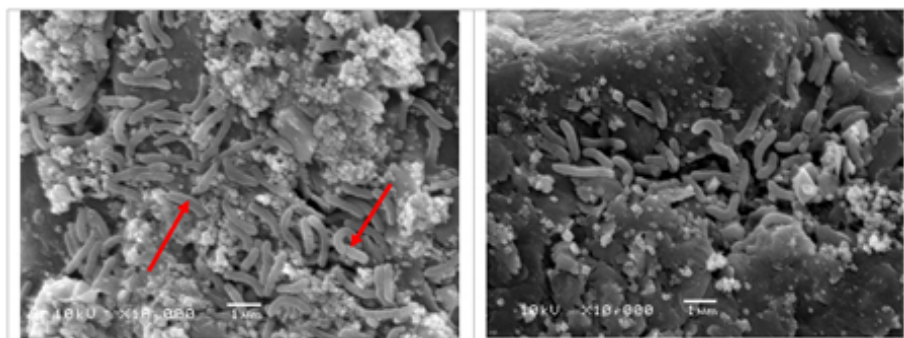
**Figura 5:** Concentração de ferro, em [g.L<sup>-1</sup>], no lixiviado da planta piloto em função do tempo.



**Figura 6:** Concentração de sulfatos, em [g.L<sup>-1</sup>], no lixiviado a planta piloto em função do tempo.

Os resultados de concentração da bactéria *A. ferrooxidans* suspensos na água de lixiviação foram de  $10^4$  e  $10^5$  NMP mL<sup>-1</sup> durante todas as semanas de biolixiviação, exceto na primeira semana, onde apresentou concentração de  $10^2$  NMP mL<sup>-1</sup>. A Figura 7 mostra uma imagem em MEV de um grão de rejeito utilizado neste trabalho durante o processo de biolixiviação. É importante considerar que nos experimentos de biolixiviação há uma quantidade considerável e irregular de bactérias na superfície das partículas minerais. As bactérias observadas nesta análise apresentam forma de bacilo com tamanho médio entre 0,8 e 1,5  $\mu$ m. Conforme descreve Brandl (2001), as bactérias acidófilas preferem concentrar-se em áreas de superfícies irregulares para realizarem a interação microbiológica. Também ocorrem em maior quantidade nas regiões onde há a presença de pirita.





**Figura 7: Imagens obtidas em MEV de diferentes áreas de um grão de rejeito de carvão na planta piloto mostrando a presença de bactérias acidofílicas.**

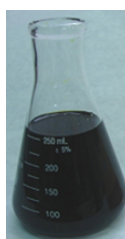
O lixiviado obtido foi evaporado até uma concentração de ferro de cerca de 120 g/L, exigido para a comercialização como coagulante e, posteriormente, purificado por filtração em membrana de 0,45  $\mu\text{m}$ . A Tabela 3 apresenta os resultados das análises do coagulante e a Figura 8 mostra o aspecto final do produto. Para fins de comparação, é apresentada também a composição química de um coagulante comercial de sulfato férrico.

Deve-se ressaltar também que não foi detectado ferro na divalente ( $\text{Fe}^{2+}$ ), logo praticamente todo o ferro está presente na forma trivalente ( $\text{Fe}^{3+}$ ). Ainda, as concentrações de alguns metais indesejáveis (como Mn e Zn) do coagulante produzido a partir do concentrado de pirita são iguais ou inferiores aos do coagulante comercial. Ainda, o coagulante filtrado não apresentou carbono orgânico na sua composição, indicando que o material orgânico referente às células mortas de bactérias foi removido no processo de filtração.

**Tabela 3: Comparação entre o coagulante sulfato férrico produzido a partir do concentrado de pirita e um coagulante comercial.**

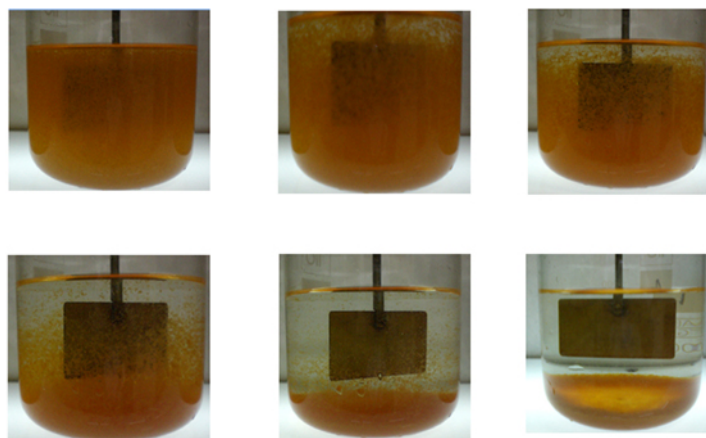
PARÂMETROS	COAGULANTE PRODUZIDO A PARTIR DO CONCENTRADO DE PIRITA	COAGULANTE COMERCIAL
pH	0,7	1,8
Fe Total, $\text{g.L}^{-1}$	122,0	115
Al, $\text{g.L}^{-1}$	3,1	4,4
Ca, $\text{g.L}^{-1}$	2,7	5,7
Mn, $\text{g.L}^{-1}$	1,6	1,6
Zn, $\text{g.L}^{-1}$	24,1	22,4
$\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{g.L}^{-1}$	182	131
COT, $\text{mg.L}^{-1}$	0,6	104
<i>A. ferrooxidans</i> , NMP:100 mL	ND*	ND*

\*ND=Não detectado.



**Figura 8: Produto obtido a partir de ensaios de lixiviação.**

Um ensaio de tratamento de água foi realizado com a água bruta do Lago Guaíba, empregando como coagulante o lixiviado férrico purificado do processo de lixiviação da pirita. A concentração empregada foi de  $24 \text{ mg.L}^{-1}$  de ferro+alumínio, definida após testes preliminares de remoção de cor e turbidez. A Figura 9 mostra a etapa de sedimentação em teste de jarros em distintos intervalos de tempo. Na Tabela 4 são apresentados os resultados das análises físico-químicas da água bruta e tratada bem como os valores estabelecidos na Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde para água potável. É possível verificar que, em todos os parâmetros analisados, a água tratada com o coagulante produzido atingiu as exigências para consumo.



**Figura 9:** Etapa de sedimentação no teste de jarros. O tempo de sedimentação foi de 10 minutos.

**Tabela 4:** Características da água bruta e da água tratada com o coagulante sulfato férrico produzido a partir do concentrado de pirita e com o coagulante sulfato férrico comercial. Dosagem aplicada de  $24 \text{ mg.L}^{-1}$  de Fe+Al em pH 6,5 na água bruta do Guaíba.

PARÂMETROS	ÁGUA BRUTA GUAÍBA	REAGENTE PRODUZIDO CONC. PIRITA	SULFATO FÉRRICO COMERCIAL	PARÂMETROS ÁGUA TRATADA NO BRASIL (PORTARIA 2.914/2011 MS)
pH	6,8	7,0	7,0	-
Turbidez, NTU	81	0,4	0,5	5
Cor, Hazen	40	2,0	2,0	15
Dureza, $\text{mg.L}^{-1}$	54	32	26	500
Fe, $\text{mg.L}^{-1}$	2,3	ND*	ND*	0,3
Al, $\text{mg.L}^{-1}$	2,4	ND*	ND*	0,2
Mn, $\text{mg.L}^{-1}$	ND*	ND*	ND*	0,1
Zn, $\text{mg.L}^{-1}$	0,15	ND*	ND*	5
Cu, $\text{mg.L}^{-1}$	ND*	ND*	ND*	2
Cr, $\text{mg.L}^{-1}$	ND*	ND*	ND*	0,05
Cd, $\text{mg.L}^{-1}$	ND*	ND*	ND*	0,005
Pb, $\text{mg.L}^{-1}$	ND*	ND*	ND*	0,01
As, $\mu\text{g.L}^{-1}$	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5
Sulfato, $\text{mg.L}^{-1}$	7,8	223	82,9	250

\*ND=Não detectado.

## CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho foi possível concluir que é possível obter o coagulante sulfato férrico a partir da lixiviação bacteriana de um concentrado de pirita da mineração de carvão. O sulfato férrico produzido mostrou-se eficaz para tratamento de água, atendendo aos parâmetros exigidos pela Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde.

Em escala piloto, após evaporação do lixiviado, foi possível produzir aproximadamente 190 L de coagulante com 12 % de Fe por tonelada ao mês. Isso permite concluir que seria necessário processar 3.200 t/mês de concentrado de pirita para abastecer com água tratada uma cidade com porte de 200.000 habitantes como, por exemplo, Criciúma. Esses valores são totalmente viáveis no contexto da mineração de carvão.

A rota biohidrometalúrgica de produção de sulfato férrico a partir da pirita pode resultar na diminuição do consumo de ácido sulfúrico e sucata ferrosa, que são os insumos na produção tradicional deste coagulante. Ainda, pode trazer benefícios para as Empresas Carboníferas, pois reduz o potencial poluidor dos módulos de rejeito e pode proporcionar ganhos econômicos decorrente da produção de um reagente para o tratamento de águas e efluentes. .

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES e a Rede Carvão pelos recursos financeiros para o desenvolvimento da presente pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Associação Brasileira da Indústria Química - ABIQUIM. Anuário Brasileiro da Indústria Química. São Paulo, 2006.
2. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Amostragem de resíduos sólidos NBR 10007. Rio de Janeiro, 21p, 2004.
3. AMARAL FILHO, J.; SCHNEIDER, I.A.H.; TUBINO, R.M.C.; BRUM, I.A.S.; MILTZAREK, G.; SAMPAIO, C. H.; SCHNEIDER, C.H. Integrated Mine Tailings Management: Possibilities for Coal Tailings Deposits in Santa Catarina State, Brazil. In: Sustainability through Resource Conservation and Recycling 2011. Falmouth, England, 2011.
4. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21. Ed. Washington D.C: APHA/AWWA/WEF, 2005. 1134p.
5. BRANDL, H. MICROBIAL LEACHING OF METALS. IN: REHM, H.J.; REED, G. (Eds), Microbial Diversity in Bioleaching Environments. Chapter 8. Wiley, p.192-206. 2001
6. BRATBY, J. Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment. 2ª edição. London: IWA Publishing, 2006.
7. BECARIA, A.; LAHIRI, D.K.; BONDLY, S.C.; CHEN, D.; HAMADEH, A.; LI, H.; TAYLOR, R.; CAMPBELL, A. Aluminum and copper in drinking water enhance inflammatory or oxidative events specially in the brain. Journal of Neuroimmunology, v.176, p.16-23, 2006.
8. COLLING, A.V.; MENEZES, J.C.S.S.; SCHNEIDER, I.A.H. Bioprocessing of pyrite concentrate from coal tailings for the production of the coagulant ferric sulphate. Minerals Engineering, v.24, p.1185-1187, 2011.
9. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. Balanço Mineral Brasileiro 2001. Brasília: DNPM, 2001.
10. FURTADO, M. Clarificação de Água. Revista Química e Derivados, v. 33, n.477, p.96-107, 2008.
11. JOHNSON, D.B., HALLBERG, K.B. The microbiology of acidic mine waters. Research in Microbiology, v.154, p.466-473, 2003.
12. KONTOPOULOS, A. Acid mine drainage control. In: Castro, S.H., Vergara, F., Sánchez, M.A. (Eds.), Effluent Treatment in the Mining Industry. University of Concepción, Chile, p.7-118, 1998.
13. MONTEIRO, K.V. (Coordenadora Geral). Carvão: O Combustível de Ontem geral. Porto Alegre: Núcleo Amigos da Terra Brasil, 2004.
14. PORTARIA Nº 2.914/2011 DO MINISTÉRIO DA SAÚDE. Brasília. Editora do Ministério da Saúde, 2011. Secretaria de Vigilância em Saúde. Coordenação-Geral de Vigilância em Saúde Ambiental.
15. RUBIO, J. Carvão Mineral - Caracterização e Beneficiamento. Porto Alegre: Nova Linha Artres Gráficas, 240p., 1988.

16. SOARES, P.S.M.; SANTOS, M.D.C.; POSSA, M.V. Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente. CETEM/MCT: Rio de Janeiro, 2008.
17. TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F.; STENSEL, H.D. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Metcalf & Eddy. Boston: McGraw Hill, 2003. 1819p.
18. WALTON, J.R. Aluminum in hippocampal neurons from humans with Alzheimer's Disease. NeuroToxicology, v.27, p.385-394, 2006.