

I-351 – PRODUÇÃO DOS COAGULANTES SULFATO FÉRRICO E SULFATO DE FERRO E ALUMÍNIO POR PRECIPITAÇÃO SELETIVA DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS

Ivo André Homrich Schneider⁽¹⁾

Engenheiro de Minas pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Mestre e Doutor em Metalurgia Extrativa pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGE3M/UFRGS). Professor Adjunto do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Pesquisador 2 do CNPq.

Jean Carlo Salomé dos Santos Menezes

Químico pela Universidade de Passo Fundo (UPF). Mestre e Doutor em Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGE3M/UFRGS). Professor do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade do Oeste do Estado de Santa Catarina (UNOESC).

Rodrigo de Almeida Silva

Químico pela Universidade de Passo Fundo (UPF). Mestre e Doutor em Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGE3M/UFRGS). Bolsista DTI SENAI/RS.

Endereço⁽¹⁾: UFRGS, Campus do Vale, DEMIN. Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre, RS, Brasil. CEP: 91501-970. Tel: (51) 3308-7104. E-mail: ivo.andre@ufrgs.br

RESUMO

A drenagem ácida de minas (DAM) é um importante problema ambiental na produção de carvão mineral. O tratamento ativo da DAM envolve a adição de reagentes alcalinos para elevar o pH e precipitar os metais dissolvidos como hidróxidos. Um dos principais problemas do processo é o grande volume de lodo gerado. Assim, o objetivo do presente trabalho foi produzir os coagulantes sulfato férrico e sulfato de ferro e alumínio por precipitação seletiva dos metais presentes na drenagem ácida de minas. Um lodo férrico foi obtido pela precipitação do ferro em pH 3,8 e um lodo de ferro e alumínio foi obtido pela precipitação conjunta do ferro e do alumínio em pH 5,1. Em ambos os casos, o precipitado foi dissolvido em ácido sulfúrico e evaporado até que a concentração de Fe + Al ficasse próxima a 12%, obtendo-se assim os reagentes sulfato férrico e sulfato de ferro e alumínio. Testes de tratamento de água mostraram que os coagulantes produzidos são eficientes no tratamento de água para abastecimento público. O processo de precipitação seletiva pode ser facilmente incorporado nas plantas de tratamento de DAM, reduzindo o volume de lodo e produzindo um reagente químico de valor comercial.

PALAVRAS-CHAVE: Drenagem Ácida de Minas, Precipitação Seletiva, Coagulação, Sulfato Férrico, Tratamento de Água.

INTRODUÇÃO

A drenagem ácida de minas (DAM) é um importante problema ambiental na produção de carvão. O tratamento ativo da DAM envolve a adição de reagentes alcalinos para elevar o pH e precipitar os metais dissolvidos como hidróxidos. Embora o tratamento ativo possa providenciar uma remediação efetiva, apresenta como desvantagens os altos custos operacionais e problemas relacionados com a disposição do lodo (Kontopoulos, 1998; Skousen et al., 1998; Matlock et al., 2002; Johnson and Hallberg, 2005).

As estações de tratamento de DAM no Brasil comumente empregam hidróxido de sódio ou hidróxido de cálcio para neutralização do efluente em pH entre 8,0 e 9,0. Os metais precipitados são removidos em lagoas de sedimentação, tanques de sedimentação convencionais, tanques de sedimentação com lamelas ou unidades de flotação por ar dissolvido (Silveira et al., 2009). O lodo contém tipicamente 2–5% de sólidos e altas concentrações de ferro e alumínio, bem como concentrações menores de manganês, zinco e outros metais (Marcello et al., 2008).

Uma maneira de minimizar a questão do lodo consiste na separação e aproveitamento dos metais (Wei et al., 2005). O lodo da DAM já foi previamente estudado para a produção de coagulantes (Rao et al., 1992), nanopartículas de óxidos de ferros (Wei e Viadero, 2007) e pigmentos inorgânicos (Marcello et al., 2008). No trabalho conduzido por Rao et al. (1992), em uma DAM de uma mina de sulfetos polimetálicos do Canadá, o sulfato férrico (SF) foi produzido pela reação de hidróxido férrico recuperado da DAM com ácido sulfúrico. Para evitar a presença de metais indesejados, aminas foram empregadas para reduzir o efeito de co-precipitação em pH 3,5–3,6.

Os coagulantes empregados para o tratamento de águas e efluentes são predominantemente sais de ferro e alumínio. Os sais de alumínio incluem sulfato de alumínio (SA) e o cloreto de alumínio (CA) bem como suas versões pré-hidrolisadas, o polissulfato de alumínio (PSA) e o policloreto de alumínio (PAC). Os sais de alumínio são os reagentes mais utilizados no tratamento de águas para abastecimento público (Bratby, 1980; ACWA, 2000, Tchobanoglous et al., 2003). Os sais de ferro são o cloreto férrico (CF), sulfato férrico (SF), policloreto férrico (PCF) e o polissulfato férrico (PSF). Os coagulantes férricos são aplicados no tratamento de vários efluentes industriais e seu uso está em crescimento para o tratamento de água e esgoto doméstico (Tenny and Derka, 1992; Jiang et al., 1996; Jiang and Graham, 1998; Tchobanoglous et al., 2003).

Outra possível alternativa é o uso de uma mistura de sais de alumínio e de ferro, como o polissulfato de ferro e alumínio (PSFA). Estudos conduzidos por Jiang and Graham (2003) demonstraram que o PSFA alcançou, em testes de tratamento de água, valores de remoção de cor e de matéria orgânica iguais ou superiores aos coagulantes convencionais. Os autores também demonstraram que os índices residuais de Fe e Al na água tratada com PSFA são inferiores quando comparados com PSF, SF ou SA.

Assim, o objetivo geral da presente pesquisa foi desenvolver o processo de precipitação seletiva para a recuperação dos metais ferro e alumínio de uma drenagem ácida de minas (DAM) e produzir coagulantes para o tratamento de água.

Os objetivos específicos foram:

- caracterizar uma drenagem ácida de mina oriunda do módulo de rejeitos de uma unidade de mineração de carvão mineral em Santa Catarina e avaliar o potencial de recuperação hidrometalúrgica de metais;
- desenvolver um processo para a precipitação seletiva dos metais ferro e alumínio na forma de hidróxidos para obtenção de lodos metálicos de alta pureza;
- desenvolver uma rota para a conversão dos hidróxidos metálicos nos coagulantes sulfato férrico e sulfato de ferro e alumínio a partir da DAM e avaliar o desempenho dos mesmos no tratamento de água para abastecimento público.

MATERIAIS E MÉTODOS

A amostra de DAM foi coletada no módulo de rejeitos de uma Empresa que extrai carvão mineral da Camada Barro Branco no Estado de Santa Catarina. A amostra foi acondicionada em um recipiente de polietileno de alta densidade com um volume de 200 L. No laboratório, a amostra foi filtrada em uma membrana de 0,45 µm e armazenada a 4°C. A DAM foi analisada em relação ao pH, concentração de metais dissolvidos e sulfato.

Os reagentes empregados no ajuste de pH nos estudos de precipitação foram o NaOH e o H₂SO₄, ambos de qualidade analítica. Água destilada foi empregada na preparação de todas as soluções. O polissulfato de alumínio comercial (PSA), produzido pela reação de ácido sulfúrico com a bauxita, foi fornecido pela “Companhia Riograndense de Saneamento” (CORSAN, RS/Brasil). O sulfato férrico comercial (SF), produzido a partir da digestão em ácido sulfúrico de sucata ferrosa, foi fornecida pela Empresa “Sulfato Rio Grande” (RS/Brasil).

O ferro e o alumínio foram recuperados da DAM por um processo oxidativo seguido de precipitação. O processo de oxidação foi realizado pela aeração da amostra por 24 h em pH entre 2,5 e 3,0 para converter todo Fe²⁺ em Fe³⁺. A quantidade de ferro ferroso foi monitorada pelo método do dicromato de potássio (Jeffery et al., 1989). A precipitação para obtenção de um lodo férrico foi realizada em pH 3,8 ± 0,1 e a precipitação para obtenção do lodo férrico-aluminoso foi realizada em pH 5,1 ± 0,1. Esses valores foram definidos a partir da curva de titulação potenciométrica realizada na amostra de DAM (Figura 1). Em cada valor de pH, o

precipitado foi separado por centrifugação durante 3 minutos a 2.500 RPM. O processo de lavagem do lodo foi realizado com água destilada no mesmo pH de precipitação dos metais. A quantidade de água de lavagem usada correspondeu a duas vezes o volume de lodo gerado. O procedimento de lavagem foi efetuado 2 vezes.

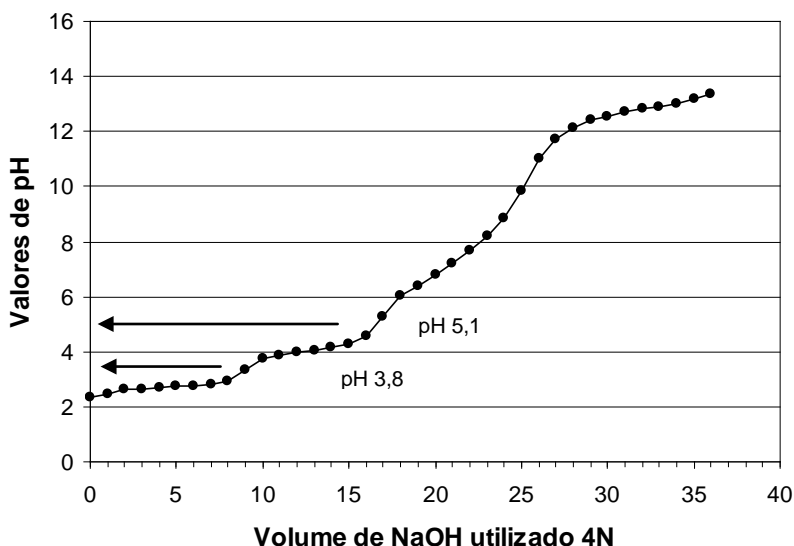
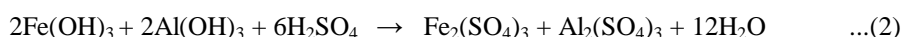


Figura 1: Curva de titulação potenciométrica da DAM aerada com NaOH 4 Normal, mostrando o pH final de hidrólise dos cátions Fe^{3+} (pH 3,8) e do Al^{3+} (pH 5,1).

A produção dos coagulantes foi realizada pela adição de ácido sulfúrico conforme a reação (1), para o sulfato férrico, e conforme a reação (2), para o sulfato de ferro e alumínio. Calculou-se a quantidade de ácido a ser adicionada pela quantidade estequiométrica de metais presentes no lodo. Após a adição do ácido, o sistema foi aquecido a uma temperatura de 80 a 90°C até a completa dissolução dos metais.



A solução gerada foi evaporada em Banho Maria a 30°C para redução do volume e, consequentemente, aumentar a concentração dos metais no meio. Os coagulantes produzidos, o $\text{SF}_{\text{DAM-pH } 3,8}$ e o $\text{SFA}_{\text{DAM-pH } 5,1}$ foram filtrados e analisados em relação aos seguintes parâmetros: pH, ferro, alumínio, metais indesejados (As, Ca, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, Zn) e SO_4^{2-} . As análises de metais foram realizadas por absorção atômica. A concentração de sulfato foi determinada pelo método gravimétrico após a ignição do resíduo. Ambos os métodos seguiram os procedimentos descritos no “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (Eaton et al, 2005). A densidade dos coagulantes foi determinada gravimetricamente em frascos volumétricos de 10 mL.

Os coagulantes obtidos nas etapas anteriores foram utilizados para o tratamento de água do Lago Guaíba usada para abastecimento público na Cidade de Porto Alegre, RS. Esses experimentos foram realizados em equipamento de “Jar Test” de forma comparativa com os reagentes polissulfato de alumínio e sulfato férrico comerciais. Os ensaios de tratamento de água foram realizados em amostras de 1000 mL de água. Os reagentes $\text{SF}_{\text{DAM-pH } 3,8}$, $\text{SFA}_{\text{DAM-pH } 5,1}$, $\text{PSA}_{\text{comercial}}$ e $\text{SF}_{\text{comercial}}$ foram adicionados na mesma concentração molar de 0,4 mM (Fe + Al). O pH foi ajustado para 7,0 e a suspensão agitada a 100 rpm por 5 minutos seguido por uma agitação lenta de 20 rpm por 3 minutos. Após, a agitação foi interrompida e o meio deixado em repouso por 10 min para a sedimentação dos coágulos. A água tratada foi analisada em relação aos seguintes parâmetros: pH, sólidos suspensos, turbidez, cor, condutividade, metais (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Cr, Cd, Pb e As), dureza e sulfatos. Todas as análises seguiram os procedimentos do “Standard Method for the Examination of Water and Wastewater” (Eaton et al., 2005).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características da DAM estão apresentadas na Tabela 1. O pH da DAM é de 2,0 e as concentrações de metais altas. Os principais metais dissolvidos na DAM bruta são o Fe (70% como Fe^{2+} e 30% como Fe^{3+}) e o Al. Outros metais, como o Mn, Zn, Ca e o Mg estavam presentes em concentrações bem inferiores. O pH e as concentrações de Fe, Mn e Zn não atingem os padrões de descarte estabelecidos pela Resolução Conama 357/2005.

Tabela 1: Análise química da drenagem ácida de minas (DAM).

Parâmetro	Concentração na DAM	Padrão de Emissão Resolução CONAMA 357/2005
pH	2,0	5 a 9
Fe (mg/L)	3360	15,0
Al (mg/L)	1260	-
Mn (mg/L)	161,5	1,0
Zn (mg/L)	82,9	5,0
Ca (mg/L)	11,8	-
Mg (mg/L)	8,4	-
Cu (mg/L)	0,27	1,0
Cr (mg/L)	0,24	0,5
Cd (mg/L)	0,06	0,2
As (mg/L)	< 0,02	0,5
Pb (mg/L)	< 0,03	0,5
SO_4^{2-} (mg/L)	9120	-

A Tabela 2 apresenta as características dos coagulantes produzidos pela precipitação dos metais em pH 3,8 e 5,1. Pode-se observar que o coagulante obtido a partir da DAM em pH 3,8 ($\text{SF}_{\text{DAM-pH } 3,8}$) é composto por 94,5% de sulfato férrico e 4,7% de sulfato de alumínio. O coagulante obtido a partir da DAM em pH 5,1 ($\text{SFA}_{\text{DAM-pH } 5,1}$) é composto por 73,6% de sulfato férrico e 24,7% de sulfato de alumínio. Ambos apresentam uma baixa concentração de contaminantes (Zn, Mn, Ca, Cu, Ni, Cd, Pb e Cr). Esses contaminantes representam 0,6% para o coagulante sulfato férrico ($\text{SF}_{\text{DAM-pH } 3,8}$) e ao redor de 1,7% para o sulfato de ferro e alumínio ($\text{SFA}_{\text{DAM-pH } 5,1}$).

Tabela 2: Composição química dos coagulantes obtidos por precipitação seletiva da DAM em pH 3,8 e em pH 5,1 ($\text{SF}_{\text{DAM-pH } 3,8}$ e $\text{SFA}_{\text{DAM-pH } 5,1}$), do sulfato férrico comercial obtido da sucata metálica ($\text{SF}_{\text{Comercial}}$); e do sulfato de alumínio obtido a partir da bauxita ($\text{SA}_{\text{Comercial}}$).

Parâmetros	$\text{SF}_{\text{DAM-pH } 3,8}$	$\text{SFA}_{\text{DAM-pH } 5,1}$	$\text{SF}_{\text{Comercial}}$	$\text{SA}_{\text{Comercial}}$
pH	1,7	1,7	1,8	2,4
Fe (mg/L)	124.024	87.155	115.000	112,5
Al (mg/L)	8.198	29.198	4.419	47.662
Zn (mg/L)	94,6	394,1	22,4	3,8
Mn (mg/L)	279,6	414,6	1.585	1,3
Ca (mg/L)	401,3	1.235,2	56,8	8,4
Cu (mg/L)	0,3	3,3	11,5	< 0,004
Ni (mg/L)	8,5	7,9	-	-
Cd (mg/L)	1,3	0,9	< 0,005	< 0,005
Pb (mg/L)	8,6	6,6	15,2	7,5
Cr (mg/L)	4,3	2,9	305,0	12,0
Hg (mg/L)	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
As (mg/L)	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
SO_4^{2-} (mg/L)	117.500	117.500	330.000	88.550
Volume (mL de coagulante por L de DAM)	23	38	-	-
Densidade (g/cm^3)	1,5	1,3	1,4	1,2

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de tratamento de água. Todos os coagulantes foram igualmente eficientes em termos de remoção de sólidos suspensos, turbidez e cor. As quantidades residuais de metais dissolvidos na água tratada foram muito baixas em todos os coagulantes empregados, inclusive no SF produzido a partir da sucata ferrosa, que apresenta uma concentração mais elevada dos metais Cu, Cr e Pb. A água tratada com todos os coagulantes atingiu os padrões exigidos na Portaria 518/2004.

Tabela 3: Características da água bruta e da água tratada com os coagulantes SF_{DAM-pH 3,6}, SFA_{DAM-pH5,1}, SF e PSA em uma dosagem de 0,4 mM (Fe + Al) em pH 7,0.

Parâmetro	Água Bruta	Tratada com SF _{DAM-pH 3,8}	Tratada com SFA _{DAM-pH5,1}	Tratada com SF _{comercial}	Tratada com PSA _{comercial}	Exigência da Portaria 518
pH	6,8	7,0	7,0	7,0	7,0	-
Sol. Susp. (mg/L)	23,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Turbidez (NTU)	81,3	0,4	0,5	0,5	0,3	5
Cor (Hazen)	44	1	2	2	2	15
Conduct. (mS/cm)	0,13	1,01	0,81	0,59	0,97	-
Fe (mg/L)	1,2	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	0,3
Al (mg/L)	< 0,08	< 0,08	< 0,08	< 0,08	< 0,08	0,2
Mn (mg/L)	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,1
Zn (mg/L)	0,04	< 0,02	< 0,02	0,06	0,11	5
Cu (mg/L)	< 0,004	< 0,004	< 0,004	0,02	< 0,004	2
Cr (mg/L)	< 0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004	0,05
Cd (mg/L)	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	0,005
Pb (mg/L)	0,06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,01
As (mg/L)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,01
Dureza (mg/L CaCO ₃)	22	127	127	134	86	500
Sulfatos (mg/L)	7,8	88,7	72,7	82,9	60,25	250

A partir dos resultados obtidos, uma análise técnica e ambiental dos reagentes produzidos pode ser realizada. Por exemplo, para o aproveitamento do lodo férrico, adaptações podem ser feitas nas atuais estações de tratamento de DAM existentes no Brasil (Figura 2). Equipamentos poderão ser instalados para a precipitação do ferro presente na DAM na faixa de pH entre 3,6 a 3,8, separação sólido-líquido (por exemplo, decantador de lamelas e filtro prensa) bem com um tanque para a dissolução do lodo em ácido sulfúrico e evaporação. As águas de saída, tanto no decantador como do filtro-prensa, deverão ainda ser tratadas visando o ajuste final do pH e a remoção de Al, Mn e Zn, entre outros metais.

A Tabela 4 resume a quantidade de DAM, reagentes químicos (NaOH e H₂SO₄) e água necessária para a produção do SF-PS_{DAM-pH3,8}. Na proposta apresentada neste trabalho, o custo para produção do coagulante não deve exceder a R\$ 400,00 / m³, enquanto que o sulfato férrico comercial é vendido a uma preço que varia de R\$ 800,00 a R\$ 900,00 / m³. Considerando que a vazão de DAM usada neste trabalho é de 1.200 m³/dia, seria possível produzir 51,7 m³ dia⁻¹ de SF-PS_{DAM-pH3,8}, suficiente para tratar água para uma população de 850.000 habitantes.

Tabela 4: Materiais necessários para a produção do SF_{DAM-pH3,8}.

Material	Quantidade
DAM (m ³ m ⁻³ de coagulante)	23,2
NaOH (kg m ⁻³ de coagulante)	354
Água (lavagem do precipitado) (m ³ m ⁻³ de coagulante)	~ 14
H ₂ SO ₄ (L m ⁻³ de coagulante)	70

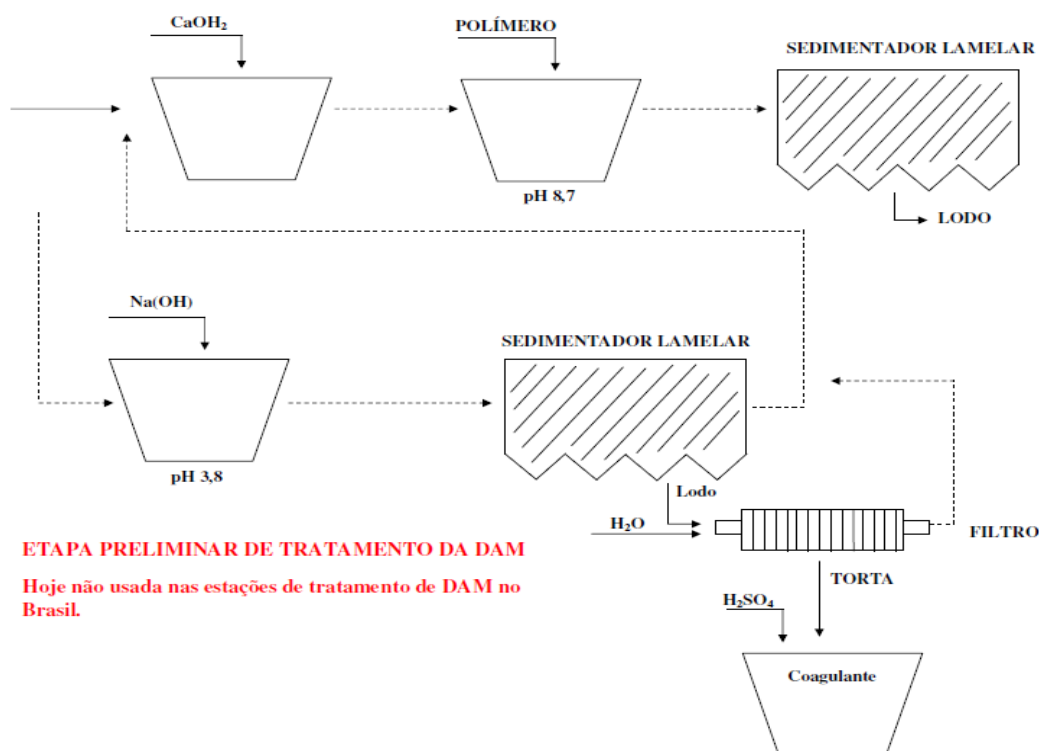


Figura 2: Concepção de um sistema para produção de coagulante ($SF_{DAM-pH\ 3,8}$) a partir da precipitação seletiva do ferro em estações de tratamento de DAM .

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que na operação de tratamento da DAM gerada na mineração de carvão mineral podem ser produzidos coagulantes para o tratamento de águas. Os lodos precipitados e purificados em $pH\ 3,8 \pm 0,1$ e em $pH\ 5,1 \pm 0,1$ foram convertidos nos coagulantes sulfato férrico e sulfato de ferro e alumínio, respectivamente. Esses reagentes tiveram desempenho satisfatório no tratamento de água para abastecimento público, com resultados similares aos obtidos com coagulantes comerciais. As vantagens ambientais estão relacionadas com a valorização do rejeito resultante da neutralização da DAM. As reduções no volume de lodo a ser descartado são de 70% com a produção do $SF_{DAM-pH\ 3,8}$ e de 95% como $SFA_{DAM-pH\ 5,1}$.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPERGS, CAPES, CNPq, Rede de Carvão e à Carbonífera Criciúma S.A. pelo auxílio financeiro para o desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACWA. Review of the Proposed Public Health Goal for Aluminum in Drinking Water. Sacramento, CA: Association of California Water Agencies, 2000.
2. BRATBY, J. Coagulation and Flocculation: With an Emphasis on Water and Wastewater Treatment. Croydon: Upland Press, 1980.
3. EATON, A.D.; CLESCERI, L.S.; RICE, E.W.; GREENBER, A.E. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st Ed. Washington D.C.: American Public Health Association, 2005.
4. JEFFERY, G.H.; BASSET, J.; MENDHAM, J.; DENNEY, R.C. Vogel's Textbook of Quantitative Chemical Analysis. London: Longman Scientific & Technical, 1989.

5. JIANG, J.Q.; GRAHAM, N.J.D.; HARWARD, C. Coagulation of upland coloured water with polyferric sulphate compared to conventional coagulants. *Journal WRTAqua*, v.45, n.3, p.143-154, 1996.
6. JIANG, J.Q.; GRAHAM, N.J.D. Preparation and characterization of an optimal polyferric sulphate (PFS) as a coagulant for water treatment. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v.73, p.351-358, 1998.
7. JIANG, J.Q.; GRAHAM, N.J.D. Development of optimal poly-alumino-iron sulphate coagulant. *Journal of Environmental Engineering*, v.129, p.699-708, 2003.
8. JOHNSON, D.B.; HALLBERG, K.B. Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the Total Environment*, v. 338, p.3-14, 2005.
9. KONTOPOULOS, A. Acid mine drainage control. In: Castro, S.H., Vergara, F., Sánchez, M.A. (Eds.), *Effluent Treatment in the Mining Industry*. Concepción, Chile: University of Concepción, pp.7-118, 1998.
10. MARCELO, R.R.; GALATO, S.; PETERSON, M.; RIELLA, H.G.; BERNARDIN, A.M. Inorganic pigments made from the recycling of coal mine drainage treatment sludge. *Journal of Environmental Management*, v.88, p.1280-1284, 2008.
11. MATLOCK, M.M.; HOWERTON, B.S.; ATWOOD, D.A. Chemical precipitation of heavy metals from acid mine drainage. *Water Research*, v.36, p.4757-4764, 2002.
12. RAO, S.R.; GEHR, R.; RINDEAU, M.; LU, D.; FINCH, J.A. Acid mine drainage as a coagulant. *Minerals Engineering*, v.5, n.9, p.1011-1020, 1992.
13. SILVEIRA, A.N.; SILVA, R.D.R.; RUBIO, J. Treatment of acid mine drainage (AMD) in South Brazil. Comparative active processes and water reuse. *International Journal of Mineral Processing*, v.29, p.92-202, 2009.
14. SKOUSEN, J.; ROSE, A.; GEIDEL, G.; FOREMAN, J.; EVANS, R.; HELLIER, W.A. *Handbook of Technologies for Avoidance and Reclamation of Acid Mine Drainage*. Morgantown, WV: National Mine Land Reclamation Center, West Virginia University, 1998.
15. TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F.L.; STENSEL, H.D. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4th Ed.. Metcalf & Eddy, Inc. New York: McGraw-Hill Book Company, 2003.
16. TENNY, A.M.; DERKA, J. Hydroxylated ferric sulphate – an aluminium salt alternative. *Water Supply*, v.10, n.4, p.167-174, 1992.
17. WEI X., VIADERO Jr., R.C., BUZBY, K.M. Recovery of iron and aluminum from acid mine drainage by selective precipitation. *Environmental Engineering Science*, v.22, p.745-755, 2005.
18. WEI X., VIADERO Jr., R.C. Synthesis of magnetite nanoparticles with ferric iron recovered from acid mine drainage: implications for environmental engineering. *Colloids and Surfaces, A, Physicochemical Engineering Aspects*, v. 294, p.280-286, 2007.