

## **II-237 – DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS DE CARVÃO CONCENTRADAS: ESTUDOS PARA A APLICAÇÃO COMO REAGENTE NO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO (COAGULANTE E REAÇÃO DE FENTON)**

**Fabrício Abella Lopes<sup>(1)</sup>**

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

**Jean Carlo Salomé dos Santos Menezes<sup>(2)</sup>**

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

**Ivo André Homrich Schneider<sup>(3)</sup>**

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

**Endereço<sup>(1)</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**

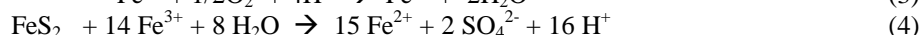
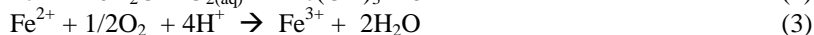
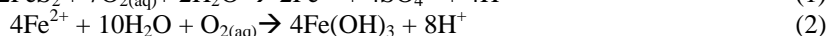
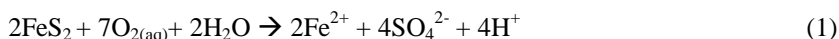
Drenagens ácidas de mina (DAM) são soluções geradas quando minerais sulfetados existentes em resíduos de mineração (rejeito ou estéril) são oxidados em presença de oxigênio e água. A DAM é um problema ambiental grave na mineração de carvão na região sul do Brasil devido a presença do mineral pirita ( $\text{FeS}_2$ ) associado ao minério. A reação de oxidação química da pirita na presença de ar e água resulta na geração dos seguintes íons dissolvidos em meio aquoso:  $\text{H}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ . O processo produz sulfato ferroso, sulfato férrico e ácido sulfúrico em meio aquoso. A elevada acidez acarreta na dissolução de outros metais presentes na matéria mineral, em maior grau o alumínio, mas também manganês e zinco. Em algumas situações, a concentração de ferro é elevada, em níveis que poderiam ser aplicado como reagente para operações de saneamento. Quando a DAM é rica em ferro na forma  $\text{Fe}^{3+}$  (e secundariamente em  $\text{Al}^{3+}$ ) pode ser aplicado como agente coagulante. Quando rica em ferro na forma  $\text{Fe}^{2+}$  pode ser aplicado com insumo para a Reação de Fenton, um processo oxidativo avançado. O objetivo do presente trabalho foi caracterizar uma DAM concentrada e avaliar o seu potencial como agente coagulante ou como insumo para a Reação de Fenton. Os resultados demonstram que a DAM, especialmente as mais concentradas e ricas em ferro podem ser empregadas no tratamento de águas residuárias. As DAM ricas em  $\text{Fe}^{+2}$  podem ser empregadas a baixo custo como fonte de ferro para a Reação de Fenton.

**PALAVRAS-CHAVE:** Drenagem ácida de mina, pirita, águas residuárias, coagulação, Reação de Fenton.

### **INTRODUÇÃO**

O beneficiamento do carvão bruto gera uma grande quantidade de rejeito, que devido às suas características, necessitam de disposição adequada para evitar a contaminação dos solos e águas, por causa da geração de drenagem ácida de mina (DAM). No Brasil, as principais reservas de carvão mineral estão localizadas no Sul do País, notadamente nos Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná (ABCM, 2009). Atualmente, 85% do carvão utilizado no Brasil é consumido na produção de termoeletricidade, 6% na indústria de cimento, 4% na indústria de papel celulose e os restantes 5% nas indústrias de cerâmica, de alimentos e secagem de grãos (MME, 2008). No entanto o problema de geração de acidez ocorre na mineração de carvão no sul do país, em especial no Estado de Santa Catarina. Essa poluição se dá porque a pirita ( $\text{FeS}_2$ ) é encontrada nas jazidas de carvão. Esta é uma questão que vem requerendo estudos no sentido de encontrar soluções que venham minimizar os danos causados ao meio ambiente.

As reações químicas que resultam na formação da drenagem ácida de minas (DAM) envolvem a oxidação de sulfetos metálicos na presença de ar e água (reações 1 a 4). Os poluentes da drenagem ácida de mina afetam a qualidade da água, baixando o pH, reduzindo a alcalinidade natural, aumentando a dureza total e acrescentando quantidades indesejáveis de ferro (nas formas  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ ), manganês, alumínio, sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e, eventualmente, outros metais pesados. Estas fontes permanecem ativas por décadas e até mesmo por séculos após a sua produção (Kontopoulos, 1998). A oxidação da pirita e algumas reações envolvidas na geração da drenagem ácida são descritas a seguir:



Devido à crescente preocupação com a questão ambiental, que tem atingido todos os setores industriais, inclusive a indústria de mineração, alguns instrumentos têm sido desenvolvidos na tentativa de conciliar desenvolvimento econômico e conservação do meio ambiente. Segundo Magena (2004), é necessário desenvolver novas tecnologias que visem o reaproveitamento destes materiais, utilizando resíduos sólidos e líquidos gerados na extração do carvão mineral.

No caso dos rejeitos da mineração de carvão, nos lixiviados estão dissolvidos sulfato férrico, sulfato ferroso e ácido sulfúrico, as quais poderiam ser utilizados. Assim, a DAM, pode ser uma fonte para a produção de reagentes para tratamento de água, em especial coagulantes (Rao *et al.*, 1992; Menezes e Schneider, 2007; Menezes *et al.*, 2009; Menezes *et al.*, 2010; Colling *et al.*, 2011). Segundo (Tchobanoglous *et al.*, 2003) as reações de hidrólise para os sais de ferro trivalentes são geralmente efetivas na faixa de pH entre 4 a 9 (reações 5 a 8).



Ao mesmo tempo, o lançamento de esgoto doméstico nos corpos d'água é um dos principais problemas ambientais enfrentados atualmente nas áreas urbanas, centros universitários e também nas regiões carboníferas do sul do Brasil. Muitos problemas de saúde pública são agravados pela falta de saneamento básico em áreas de grande ocupação humana. Os esgotos atingem proporções preocupantes quando provêm das grandes concentrações urbanas. Os esgotos que chegam à estação de tratamento de esgotos (ETE) são basicamente originados de três fontes distintas: esgoto doméstico (incluindo residências, instituições e comércio), águas de infiltração e despejos industriais. Os esgotos domésticos contêm aproximadamente 99,99% de água e 0,1% de sólidos (suspensos e dissolvidos). Destacam-se os sólidos orgânicos como proteínas, carboidratos e lipídeos; componentes como amônia, nitrato e fosfatos; microrganismos (bactérias, fungos, protozoários, vírus e helmintos) e uma leve alcalinidade (Jordão e Pessoa, 1995; von Sperling, 2005).

Em algumas situações, a concentração de ferro na DAM é elevada, em níveis que poderiam ser aplicados como reagente para operações de saneamento. Quando a DAM é rica em ferro na forma  $\text{Fe}^{3+}$  (e secundariamente em  $\text{Al}^{3+}$ ) pode ser aplicado como agente coagulante. Quando rica em ferro na forma  $\text{Fe}^{2+}$  pode ser aplicado com insumo para a Reação de Fenton (1894) (reação 9), um processo oxidativo avançado (POA) (Tchobanoglous *et al.*, 2003).



Assim, o objetivo do presente trabalho foi caracterizar uma drenagem ácida de minas concentrada e avaliar o seu potencial como agente coagulante ou como insumo para a Reação de Fenton no tratamento de esgoto cloacal.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A drenagem ácida de mina (DAM) foi fornecida pela empresa Carbonífera Criciúma S.A. localizada no município de Forquilha - SC. A amostra foi obtida em uma unidade experimental de prevenção da DAM pelo método de coberturas secas de rejeitos de carvão da Mina Verdinho, em Forquilha - SC (Soares *et al.*, 2009). A amostra foi armazenada em um recipiente de polietileno de alta densidade e selado para impedir a entrada de oxigênio atmosférico. O período de armazenamento não excedeu 20 dias. A caracterização da DAM usada no experimento é necessária, pois as concentrações de metais nela presentes, principalmente de ferro e alumínio, são essenciais para os processos de coagulação e Reação de Fenton. Foram feitas análises em relação

aos parâmetros: pH, sólidos totais, sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, sólidos sedimentáveis, coliformes termotolerantes e totais, Fe (total e nas formas  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ ), Mn, Cu, Zn, Al, DQO,  $\text{DBO}_5$ , nitrogênio total Kjeldahl, fósforo e sulfatos (APHA, 2005). As características da DAM estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1. Características da DAM utilizada no experimento.**

Parâmetros	DAM
pH	1,46
Sólidos totais (mg/L)	711
Sólidos suspensos (mg/L)	308
Sólidos dissolvidos (mg/L)	403
Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	ND
Ferro total (mg/L)	17648
$\text{Fe}^{2+}$ (mg/L)	15079
$\text{Fe}^{3+}$ (mg/L)	2569
Manganês (mg/L)	90
Cobre (mg/L)	90
Zinco (mg/L)	34
Alumínio (mg/L)	534
DQO (mg/L)	67
$\text{DBO}_5$ (mg/L)	22
Nitrogênio total Kjeldahl (mg/L)	78
Fósforo (mg/L)	17
Sulfatos (mg/L)	9264
Sólidos sedimentáveis (mL/L)	ND

ND= Não detectado

O esgoto sanitário, utilizado para execução deste trabalho foi coletado junto à Estação de Recuperação da Qualidade Ambiental (ERQA) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre - RS. A ERQA é responsável pelo tratamento de aproximadamente 60% do esgoto sanitário do Campus do Vale, lançado na Barragem Mãe D'água, corpo receptor do esgoto do Campus do Vale da UFRGS. O processo de tratamento ocorre exclusivamente em um reator biológico seqüencial em batelada (RSB) de 430 m<sup>3</sup>. O RSB funciona por ciclos seqüenciais (de segunda-feira a sexta-feira) de operação de tratamento. Um ciclo envolve as fases de enchimento, reação aeróbica, sedimentação dos sólidos em suspensão, drenagem do efluente clarificado (De Luca, 1993).

A aplicação da DAM foi estudada em laboratório em Teste de Jarros (60 rpm, 20 min) no tratamento de uma amostra de 200 mL esgoto sanitário da UFRGS. Nos estudos de coagulação simples, a DAM foi aplicada em uma concentração de 85 mg/L de Fe (ou 90 mg/L de Fe+Al). Aplicaram-se duas metodologias distintas. O Método (1) avaliou a coagulação simples e o Método (2) observou-se o efeito da carga somado ao choque de pH.

Método (1): Ajustou-se prontamente o pH para 9,0 com NaOH 2,0 M para a formação dos coágulos e separação do clarificado. Método (2): O pH foi ajustado para 3,5 com a adição de apenas 3 gotas de HCl 2,0 M, pois a acidez da DAM contribuiu para o baixo consumo do reagente acidulante. Esperou-se um período de 3 h. Após ajustou-se o pH para 9,0 para a precipitação dos metais e posterior separação do clarificado. Os clarificados de ambos os estudos de coagulação foram analisados em relação aos seguintes parâmetros: pH, turbidez, cor, carbono orgânico total (COT), nitrogênio total Kjeldahl, fósforo e bactérias do grupo Coliforme Termotolerantes (APHA, 2005). Testes de toxicidade aguda para aos microcrustáceos *Daphnia similis* (OECD, 2004) e para os peixes *Pimephales promelas* (OECD, 1992) foram feitos apenas para o clarificado obtido na segunda metodologia.

Para o estudo da Reação de Fenton também usou-se igual volume de esgoto sanitário, a DAM foi aplicada em uma concentração de 85 mg/L de Fe (ou 72 mg/L de  $\text{Fe}^{2+}$ ). Ajustou-se o pH para 3,5 com a adição de HCl 2,0 M; adicionou-se 2,5 mL/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$  35% (m/v) e esperou-se um período de 3 h. Tempo necessário para que a reação proceda-se com maior eficiência e com menores quantidades de peróxido de hidrogênio residuais. Após

adicionou-se álcali (NaOH 2,0 M) para que o pH chegasse a 9,0 para a formação dos coágulos e posterior separação do clarificado em cone de Imhoff. O clarificado também foi analisado em relação à toxicidade e a os mesmos parâmetros das duas metodologias acima descritas.

Os testes de toxicidade aguda para o microcrustáceo *Daphnia similis* foram realizados conforme o *Guideline for Testing of Chemicals* (OECD, 2004 - *Revised proposal for updating Guideline method 202, Daphnia sp. Acute immobilisation Test*). Esse teste avalia os efeitos tóxicos imediatos de uma amostra sobre a mobilidade desta espécie de microcrustáceo. É baseado na exposição dos organismos a uma série de diluições da amostra e tem duração de 48 horas. O ensaio é executado em sistema estático, sem troca de soluções e os organismos não são alimentados. O efeito sobre os organismos é expresso pela perda de mobilidade. O resultado é calculado por procedimento estatístico e representado pela concentração de efeito a 50% da população (CE-50 – 48 h). O valor inverso da maior concentração teste que não causa efeito nenhum sobre os organismos testados é chamado fator de toxicidade ou diluição (FT – 48 h) e representa a diluição que a amostra precisa sofrer para deixar de causar efeitos tóxicos agudos. Segundo a norma, os resultados obtidos através do CE-50 podem ser traduzidos da seguinte maneira: CE-50 < 25 % - extremamente tóxica, CE-50 25-50 % - altamente tóxica, CE-50 50-65 % - medianamente tóxica, CE-50 > 65% - pouco tóxica.

Os testes de toxicidade aguda para os peixes *Pimephales promelas* foram realizados conforme o *Guideline for Testing of Chemicals* (OECD, 1992 - *Guideline 203, Fish Acute Toxicity Test*). O teste de toxicidade aguda com *Pimephales promelas* avalia os efeitos tóxicos imediatos de uma amostra sobre a sobrevivência desta espécie de peixe. É um ensaio cuja exposição dos organismos a uma série de diluições da amostra tem duração de 96 horas, sendo que os organismos não são alimentados. O efeito sobre os organismos é expresso pela mortalidade dos peixes. O resultado é calculado por procedimento estatístico e representado pela concentração letal a 50% da população (CL-50 – 96 h). O valor inverso da maior concentração que não causa efeito nenhum sobre os organismos testados, após 48 horas de exposição, é denominado de fator de toxicidade ou de diluição (FT – 48 h) e representa a diluição que a amostra precisa sofrer para deixar de causar efeitos tóxicos agudos para peixes.

As análises físico-químicas foram realizadas nos seguintes Laboratórios: Laboratório de Estudos Ambientais para Metalurgia (LEAmet) e Laboratório de Tecnologia Mineral Ambiental (LTM) ambos nas dependências da UFRGS. A avaliação da ecotoxicidade dos efluentes gerados foi realizada nos laboratórios da empresa Bioensaio na cidade de Viamão, RS.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A caracterização da amostra de DAM revelou que a concentração de Ferro total chega a 17,6 g/L ou aproximadamente 1,76%. O ferro encontra-se predominantemente na forma bivalente, sendo aproximadamente 85% como  $\text{Fe}^{+2}$  e 15% como  $\text{Fe}^{+3}$ .

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no tratamento do esgoto. Pode-se observar que o tratamento por coagulação (em ambas as metodologias aplicadas) promoveu uma significativa remoção dos sólidos suspensos, reduzindo significativamente a turbidez e cor do esgoto. No entanto o segundo método mostrou-se mais eficaz na maioria dos parâmetros analisados, pois o contato prolongado do esgoto doméstico com a DAM promoveu uma boa redução do pH da mistura ocasionando assim um maior decaimento nos valores.

O tratamento utilizando a Reação de Fenton mostrou-se bastante eficaz. As reduções principalmente nos parâmetros Cor, COT e coliformes termotolerantes devido à forte oxidação promovida pelos radicais  $\cdot\text{OH}$ . Como consequência da oxidação da matéria orgânica e precipitação/decantação dos metais, os parâmetros P total e N total Kjeldahl também foram melhorados em relação às duas metodologias anteriormente descritas.

**Tabela 2. Parâmetros de qualidade da água considerando esgoto bruto, tratado por coagulação (Métodos 1 e 2) e tratado pela Reação de Fenton.**

Parâmetros	Valor			
	Esgoto bruto	Tratado Coagulação Método 1	Tratado Coagulação Método 2	Tratado Reação de Fenton
pH	6,6	9,0	9,2	9,0
Turbidez (NTU)	12,3	1,2	0,38	0,35
Cor (Hazen)	233	70	61	19
COT (mg/L)	88,5	66,6	29,2	16,9
P total (mg/L)	2,29	0,06	0,35	0,12
N total Kjeldahl (mg/L)	67,3	61,2	61,9	31,9
Col Termot. (NMP/100mL)	23.000	6.200	4.500	< 2

Também é possível analisar as eficiências dos processos estudados pelos níveis de remoção de alguns parâmetros. Os resultados obtidos pelo Método (1) foram: COT = 25%, N total Kjeldahl = 9%, P total = 97% (melhor resultado dentre os tratamentos realizados) e coliformes termotolerantes = 73%. As eficiências de remoção obtidas pelo Método (2) foram: COT = 67%, N total Kjeldahl = 8%, P total = 85% e coliformes termotolerantes = 80%. O tratamento pela Reação de Fenton foi ainda mais eficaz. As porcentagens de remoção foram: COT = 81%, N total Kjeldahl = 53%, P total = 95% e coliformes termotolerantes = 100%. Demonstrando assim que este último processo é realmente eficaz quando se levam em conta os parâmetros analisados neste estudo.

**Tabela 3. Níveis de remoção nos tratamentos por coagulação (Métodos 1 e 2) e Reação de Fenton.**

Parâmetros	Tratado Coagulação Método 1	Tratado Coagulação Método 2	Tratado Reação de Fenton
Turbidez (NTU)	90%	97%	97%
Cor (Hazen)	70%	74%	92%
COT (mg/L)	25%	67%	81%
P total (mg/L)	97%	85%	95%
N total Kjeldahl (mg/L)	9%	8%	53%
Col Termot. (NMP/100mL)	73%	80%	100%

Outro aspecto importante relativo à emissão de efluentes líquidos são os parâmetros ecotoxicológicos. As Tabelas 4 e 5 mostram os resultados obtidos para os testes de toxicidade aguda para o microcrustáceo *Daphnia similis* e para o peixe *Pimephales promelas* na amostra de esgoto bruto e após os tratamentos de coagulação nas duas metodologias estudadas e para o tratamento através da Reação de Fenton com a DAM. Deve-se observar que a análise foi realizada após o decaimento total do peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) residual.

**Tabela 4. Ensaios de toxicidade para o microcrustáceo *Daphnia similis*.**

Parâmetros	Esgoto bruto	Coagulação com DAM método 1	Reação de Fenton
FT (Fator de toxicidade)	32	32	2
CE-50 (%)	4,7	4,42	> 100
Toxicidade	Tóxica	Tóxica	Tóxica

Os ensaios ecotoxicológicos agudos com o microcrustáceo *Daphnia similis* mostraram que o esgoto bruto apresenta um FT (fator de toxicidade) igual a 32 e um de CE-50 (concentração de efeito a 50% da população) igual a 4,27%, enquadrando-o como um efluente extremamente tóxico. O tratamento por coagulação não mostrou melhoria em comparação com o esgoto bruto, pois o valor do FT foi de 32 e o CE-50 ficou em 4,42%, classificando-o como extremamente tóxico. O tratamento através da reação de Fenton proporcionou bons



resultados comparado aos tratamentos anteriores. Após a eliminação do peróxido residual, o FT baixou para 2 e o CE-50 passou para > 100.

**Tabela 5.** Ensaios de toxicidade aguda para o peixe *Pimephales promelas*.

Parâmetros	Esgoto bruto	Coagulação com DAM método 1	Reação de Fenton
FT (Fator de toxicidade)	8	8	4
CL-50 – 48h (%)	17,7	32,42	45,85
Toxicidade	Tóxica	Tóxica	Tóxica

Os ensaios ecotoxicológicos agudos com os peixes *Pimephales promelas* apontaram que o esgoto bruto possui um valor de FT igual a 8 (tóxico) e o valor da CL-50 (concentração letal a 50% da população) de 17,70%. Após o tratamento o tratamento através da coagulação não mostrou uma significativa melhoria em comparação com o esgoto bruto, pois o valor de FT se manteve em 8 e o CL-50 foi medido em 32,42%. O tratamento via Reação de Fenton proporcionou alguma melhoria em relação ao efluente bruto. A análise do efluente obtido através da Reação de Fenton após a eliminação do peróxido residual mostrou valores de FT igual 4 e de CE-50 45,85%, evidenciando que o efluente ainda apresenta toxicidade. Entretanto, houve uma boa melhoria em relação a o esgoto bruto.

## CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que a DAM, especialmente as mais concentradas e ricas em ferro podem ser empregadas no tratamento de águas residuárias. As DAM ricas em  $\text{Fe}^{+2}$  podem ser empregadas a baixo custo como fonte de ferro para a Reação de Fenton. Os resultados demonstram que o esgoto bruto apresentava toxicidade para crustáceos *Daphnia similis* e peixes *Pimephales promelas*. A coagulação simples se mostrou ineficaz na redução da toxicidade que demonstra que a toxicidade é decorrente de substâncias solúveis. A Reação de Fenton permitiu uma grande redução na toxicidade. Contudo, deve ser eliminada a presença de peróxido de hidrogênio residual.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelos recursos financeiros e bolsas concedidas para o desenvolvimento do presente trabalho. Também agradecemos ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS e a Carbonífera Criciúma S/A pela disponibilidade das amostras de efluentes, assim como aos demais colegas do LEAmet e LTM pelo apoio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABCM. Associação Brasileira do Carvão Mineral. Lavra e beneficiamento Disponível em: <[www.carvaomineral.com.br/abcm/gm\\_lavra.asp](http://www.carvaomineral.com.br/abcm/gm_lavra.asp)>. Acesso em: 1º mai. 2009.
2. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SWMEWW). 21<sup>th</sup> Edition. Washington D. C.: APHA-AWWA-WEF, 2005.
3. 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. 23, p.1185-1187, 2011.
4. DE LUCA, S. J; MARQUES, D. M; MONTEGGIA, L. O. Eficiência Operacional de Reator Sequencial em Batelada. Campus do Vale/IPH/UFRGS. In: 27º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2., Tomo I, 1993, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, Brasil: ABES, 1993, p. 440-457.
5. FENTON, H. J. H. Oxidation of tartaric acid in presence of iron. Journal of Chemical Society, v. 65, p. 899-910, 1894.
6. JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. Tratamento de Esgotos Domésticos. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 6ª edição, 2011.
7. 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, 1998.

8. MAGENA, S. J., Application of a life cycle impact assessment framework to evaluate and compare environmental performances with economic values of supplied coal products. *Journal of Cleaner Production*, v. 14, p. 1071-1084, 2004.
9. MENEZES, J.C.S.S.; SCHNEIDER, I.A.H. Produção de um coagulante a base de ferro ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) a partir de rejeito de mineração de carvão (pirita). *Anais do XXII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia*, CD ROM, Ouro Preto, MG, 2007.
10. MENEZES, J.C.S.S., SILVA, R.A., ARCE, I.S., SCHNEIDER, I.A.H. Production of a polyferric sulphate chemical coagulant by selective precipitation of iron from acidic coal mine drainage. *Mine Water and the Environment*, v.28, p.311-314, 2009.
11. MENEZES, J.C.S.S., SILVA, R.A., ARCE, I.S., SCHNEIDER, I.A.H. Production of a polyalumino-iron sulphate coagulant by chemical precipitation of a coal mining acid drainage. *Minerals Engineering*, v.23, p. 249-251, 2010.
12. MME. Ministério de Minas e Energia. Anuário Energia – Resultados Preliminares 2008. Disponível em: <www.mme.gov.br/site>. Acesso em 1º mai. 2009.
13. ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). Guideline for Testing of Chemicals. Guideline 203, Fish Acute Toxicity Test. Paris, 1992.
14. ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). Guideline for Testing of Chemicals. Revised proposal for updating Guideline 202, Daphnia sp. Acute immobilisation Test. Paris, 2004.
15. RAO, S. R.; GEHR, R.; RIENDEU, M.; LU, D.; FINCH, J. A. Acid mine drainage as a coagulant. *Minerals Engineering*, v. 5, n. 9, p. 1011-1020, 1992.
16. SOARES, A.B., UBALDO, M.O., SOUZA, V.P., SOARES, P.S.M., BARBOSA, M.C., MENDONÇA, M.G. Design of a Dry Cover Pilot Test for Acid Mine Drainage Abatement in Southern Brazil. I: Materials Characterization and Numerical Modeling. *Mine Water and Environment*, v. 28, n.3, p. 219-231, 2009.
17. TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON F.; STENSEL, H.D. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*: Metcalf & Eddy. Boston: McGraw Hill, 2003. 1819p.
18. VON SPERLING, MARCOS. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 428p.