

INTERPRETAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE EFLUENTES GERADOS EM SISTEMAS DO TIPO REJEITO-COBERTURA

Vicente P. de Souza¹, Mario V. Possa¹, Paulo Sérgio M. Soares¹, Anderson B. Soares¹; Márcia R.R. de Souza²

¹CETEM - Centro de Tecnologia Mineral
Av. Pedro Calmon, 900, CEP 21941-908, Rio de Janeiro - RJ

²Carbonífera Criciúma S.A. - Mina Verdinho
Rua: Nereu Beloli, 44, CEP 88850-00, Forquilha - SC

E-mail: vpsousa@cetem.gov.br, mpossa@cetem.gov.br, psoares@cetem.gov.br, aborghetti@cetem.gov.br;
marciaraquel@carbocri.com.br

RESUMO

A qualidade da água percolada em rejeitos de mineração fornece informações úteis que permitem verificar se o fenômeno da drenagem ácida de minas (DAM) está ocorrendo em tais rejeitos. A geração de DAM acontece quando rejeitos contendo minerais sulfetados (principalmente pirita) são expostos à ação da água e do oxigênio do ar. A interpretação dos parâmetros físico-químicos serve como indicativo para caracterizar a DAM. Este trabalho tem como objetivo apresentar e interpretar os parâmetros físico-químicos determinados em efluentes coletados em células experimentais projetadas em campo, sendo que uma simula um sistema do tipo rejeito-cobertura e a outra o rejeito sem cobertura. Nestas células são regularmente mensuradas parcelas do balanço hídrico e coletadas amostras de água onde são analisados valores de pH, potencial redox (Eh), condutividade elétrica(CE) e temperatura (T). As células fazem parte de uma unidade protótipo instalada em uma área de mineração de carvão, no município de Forquilha - SC. Esta unidade foi projetada e atualmente é operada pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), cuja finalidade é estudar o desempenho de diferentes sistemas de cobertura seca na mitigação dos efeitos da DAM. A partir dos dados físico-químicos dos efluentes das células experimentais, presume-se que a DAM não está ocorrendo na célula em que o foi aplicada uma cobertura do tipo barreira capilar dupla, composta por camadas de cinzas de fundo e argila compactada. Estes dados físico-químicos, principalmente os de condutividade elétrica, estão em perfeita consonância com os resultados das análises químicas realizadas nos efluentes percolados pelos rejeitos, que serão publicados em breve.

PALAVRAS-CHAVE: Drenagem Ácida de Minas; Rejeito; Cobertura Seca.

1. INTRODUÇÃO

A poluição hídrica devido à drenagem ácida de mina (DAM) é o principal impacto ambiental na região sul de Santa Catarina. Os depósitos de rejeitos oriundos do beneficiamento do carvão mineral, com elevado teor do mineral sulfetado pirita (FeS_2), sob a ação da água da chuva, do oxigênio do ar e de bactérias, geram um efluente ácido que pode contaminar não só as águas superficiais, como também as subterrâneas, ocasionando sérios danos ambientais em extensas áreas. A taxa de produção de ácido é controlada por fatores tais como a temperatura, pH, mineralogia e atividade microbiológica. O completo entendimento deste mecanismo requer um conhecimento interdisciplinar. A oxidação dos sulfetos e a conseqüente acidificação das águas percoladas no rejeito é inicialmente uma reação lenta que pode ser catalisada por processos microbiológicos, principalmente quando o pH da água atinge valores inferiores a 3,5.

Uma das alternativas técnicas para a redução dos impactos ambientais causados pela DAM é a cobertura seca aplicada sobre os rejeitos de carvão potencialmente causadores de acidez. Cobertura seca é uma técnica de prevenção e controle da drenagem ácida de mina que objetiva minimizar a infiltração da água e a exposição do rejeito ao oxigênio do ar, inibindo assim os efeitos da DAM. As coberturas podem ser simples ou complexas, empregando uma ou várias camadas, constituídas de diferentes materiais, incluindo solos, rejeitos não reativos, geossintéticos e materiais para consumo de oxigênio (Mend, 2001). O uso de coberturas secas em diversas regiões do mundo

tem sido amplamente relatado na literatura (O’Kane *et al.*, 2002, Mend, 2001; Souza *et al.*, 2007, Adu-wusu & Yanful, 2006). Devido às condições climáticas do Estado de Santa Catarina, uma alternativa de cobertura seca que pode ser aplicada é a de barreira capilar dupla. Ubaldo (2005) estudou a utilização de cinzas de fundo como barreira capilar dupla aplicada em uma cobertura seca sobre rejeitos de carvão. Cinzas de fundo são produzidas como resíduo no processo de queima do carvão para geração de energia elétrica. Os resultados do estudo indicaram que estas cinzas podem ser utilizadas como material drenante em coberturas secas em substituição à areia. A utilização de resíduos como cobertura foi sugerida também por outros pesquisadores (Cabral *et al.*, 2000; Borma *et al.*, 2002, 2003; Heineck *et al.*, 2003).

O Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), com o apoio financeiro da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e da Carbonífera Criciúma S.A. (CCSA), projetou e construiu na Mina Verdinho, localizada no Município de Forquilha/SC, uma unidade protótipo em escala piloto para avaliar o desempenho de diferentes tipos de cobertura seca, com e sem o emprego de barreiras capilares utilizando cinzas de fundo (Souza *et al.*, 2007; Borghetti Soares *et al.*, 2009, 2010). O presente trabalho tem como objetivo apresentar resultados parciais dos estudos realizados nesta unidade protótipo.

2. MATERIAIS E METODOLOGIA

A unidade protótipo operada pelo CETEM na Mina Verdinho da CCSA desde outubro de 2007 é composta basicamente por 3 elementos principais, conforme mostrado na Figura 1:

- (1) um aterro que abriga quatro cavidades preenchidas com rejeito grosso, com diferentes sistemas de cobertura. O conjunto “*cavidade com rejeito + cobertura*” será denominado no presente trabalho de célula. Foram projetadas quatro células: três com diferentes coberturas e uma com rejeito descoberto. As amostras de água percolada no rejeito são coletadas em um poço subterrâneo (Figura 1). O volume de escoamento superficial é acumulado em reservatórios e posteriormente medido.
- (2) uma estação meteorológica, para obtenção de dados de temperatura do ar, pressão atmosférica, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento e precipitação. A evaporação é estimada a partir de dados obtidos na estação em um tanque evaporimétrico;
- (3) um laboratório para análises físico-químicas expeditas dos efluentes coletados, para obtenção de dados de pH, condutividade elétrica (CE) e potencial redox (Eh). As concentrações de espécies químicas dissolvidas dos efluentes são determinadas em laboratórios contratados.



Figura 1 - Vista geral da unidade protótipo piloto.

Os resultados aqui apresentados referem-se a duas das quatro células mencionadas anteriormente e representadas esquematicamente na Figura 2 a saber:

(A)célula 1: rejeito grosso sem cobertura, sendo o referencial às demais condições. Este rejeito possui granulometria grossa (de 1 a 32mm) e convencionalmente será referido no texto como rejeito grosso;

(B)célula 4: rejeito grosso coberto por uma camada de rejeito misturado, uma camada de cinza de fundo compactada (grau de compactação de 90% e umidade em campo 10 % abaixo da ótima), uma camada de argila compactada (grau de compactação de 100% e umidade em campo 1,7% abaixo da ótima), uma camada de cinza de fundo compactada (grau de compactação de 90% e umidade em campo 8% abaixo da ótima) e uma camada de solo vegetal. A camada de cinza de fundo tem função de barreira capilar e a configuração “cinza+argila+cinza” corresponde a uma cobertura do tipo barreira capilar dupla. A cinza utilizada foi obtida na Tractebel (Capivari de Baixo-SC).

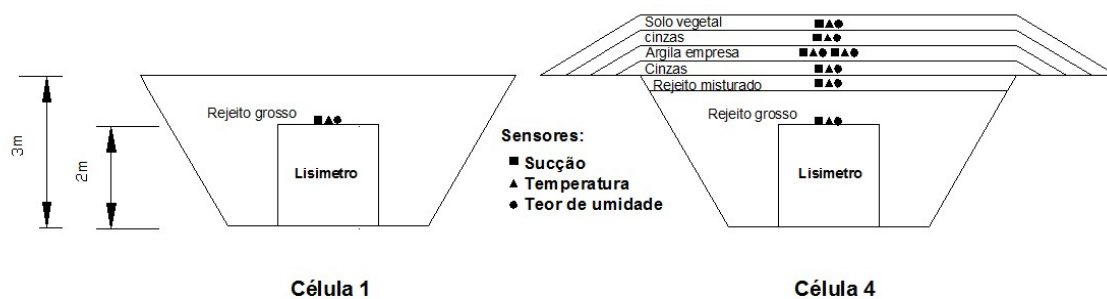


Figura 2 - Sistemas rejeito-cobertura na unidade protótipo piloto.

As camadas de coberturas foram dimensionadas com uma espessura de 30cm cada e a camada de rejeito com 3m. Uma cavidade (cava) na forma de tronco de pirâmide invertido (base = 4x4m, topo = 7,5x 7,5m, altura = 3m e volume de 110m³) foi dimensionada para conter o rejeito. Cada cava foi revestida nas paredes internas e fundo com geomanta impermeável e no seu interior foi instalado um lisímetro (diâmetro = 2m, altura = 2m e volume de 6,28m³) para a coleta de uma parcela do volume de água percolado no rejeito. As células representam um modelo que reproduz a parte superior de uma pilha de rejeitos com diferentes tipos de cobertura. Os resultados das modelagens feitas com o programa Soilcover (GeoAnalysis, 2000) conduziram ao projeto das células (Borghetti Soares *et al.*, 2009).

O rejeito grosso é composto por uma mistura dos três tipos de rejeitos gerados na Usina de Beneficiamento da CCSA (CETEM, 2001): o R₁ (rejeito piritoso), o R₂ (rejeito xistoso) e o R₃ (rejeito argiloso), que são materiais com *top size* de 37 a 25mm. O rejeito grosso disposto nas células possui a seguinte composição percentual em massa: R₁ = 50%; R₂ = 44% e R₃ = 6%. O rejeito misturado é composto dos rejeitos grosso e fino (*top size* 1mm) e resulta em um material composto cuja condutividade hidráulica é inferior à do rejeito grosso, uma vez que os poros entre as partículas deste rejeito são preenchidos com partículas do rejeito fino. A composição química dos rejeitos e materiais de cobertura é apresentada na Tabela I.

Tabela I – Composição química dos rejeitos e materiais de cobertura das células experimentais.

	Rejeito Grosso	Rejeito Misturado	Argila Jazida CCSA	Cinzas Grossa (fundo)	Solo Vegetal
Elementos	Teor (%)	Teor (%)	Teor (%)	Teor (%)	Teor (%)
Enxofre total	6,02	6,44	0,07	0,15	0,03
Enxofre pirítico	5,81	6,34	0,02	0,14	0,02
Enxofre sulfático	0,21	0,10	0,05	0,01	0,01
Enxofre orgânico	ND	ND	ND	ND	ND
Sílica (SiO₂)	48,67	42,06	81,12	56,60	72,32
Alumínio (Al₂O₃)	18,48	19,73	5,25	23,13	11,15
Sódio (Na₂O)	0,73	0,79	0,40	0,86	0,38
Magnésio (MgO)	0,07	0,10	0,03	0,13	0,07
Ferro (Fe₂O₃)	8,25	8,69	3,95	6,48	4,83
Cálcio (CaO)	0,48	0,95	0,10	0,87	0,07
Manganês (MnO₂)	0,03	0,03	0,02	0,05	0,03
Zinco (ZnO)	0,03	0,03	0,003	0,01	0,005
Potássio (K₂O)	1,73	1,52	0,17	2,23	0,17
Titânio (TiO₂)	0,87	0,88	1,89	1,21	1,60
Zircônio (ZrO₂)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Perda ao Fogo	16,72	20,30	4,31	5,85	7,21
Cromo total (Cr)	0,02	0,01	0,002	0,01	0,003
Cobre (Cu)	0,009	0,009	0,007	0,009	0,008
Cloretos (Cl)	0,03	0,009	0,01	0,15	0,15

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Amostras representativas nas células 1 (rejeito sem cobertura) e 4 (rejeito coberto com barreira capilar dupla) foram regularmente coletadas e analisadas para avaliar a qualidade dos efluentes percolados. Os valores de pH, condutividade elétrica (CE) e potencial de REDOX (Eh), foram determinados no laboratório da unidade protótipo. Paralelamente, a cada 30 minutos, foram armazenados em *data logger* (modelo CR10X, Campbell Scientific) dados de temperatura colhidos com sensores instalados nas camadas de rejeito e materiais de cobertura.

Como se observa no gráfico da Figura 3, para a célula 1 os valores de pH do efluente percolado oscilaram numa faixa acentuadamente ácida e bem restrita (0,85 - 1,30), enquanto potencial Redox permaneceu por todo o período operando na região de oxidação (600 - 700mV), contribuindo significativamente para a solubilização das espécies químicas. Em contrapartida, para o efluente percolado da célula 4, o gráfico da Figura 4 mostra um comportamento distinto do observado na célula 1, com valores de pH oscilando em uma faixa neutra (6,0 - 7,0) e potencial Redox sempre em uma região de redução (250 - 400 mV). O efluente percolado da célula 4 apresentou valores de pH dentro do limite aceitável de acordo com a legislação ambiental (CONAMA Resolução N^o 357, 2005).

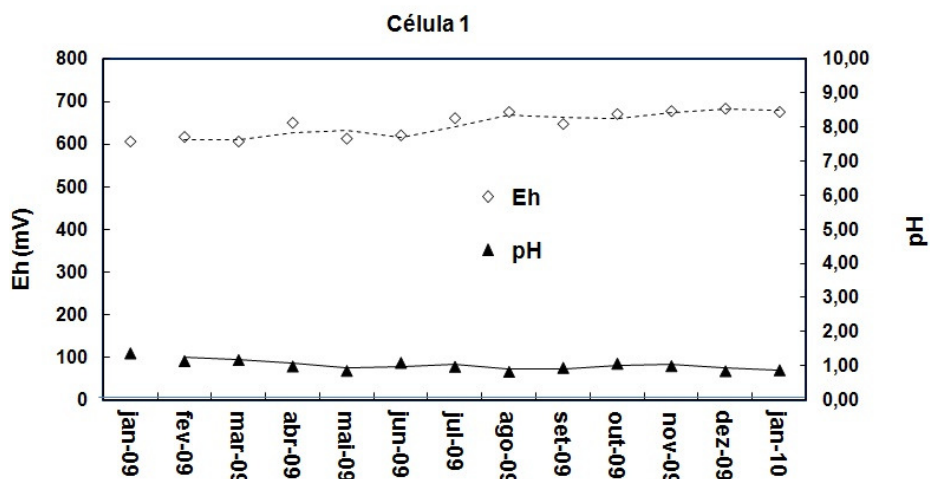


Figura 3 - Eh x pH do efluente percolado na célula 1 no ano de 2009.

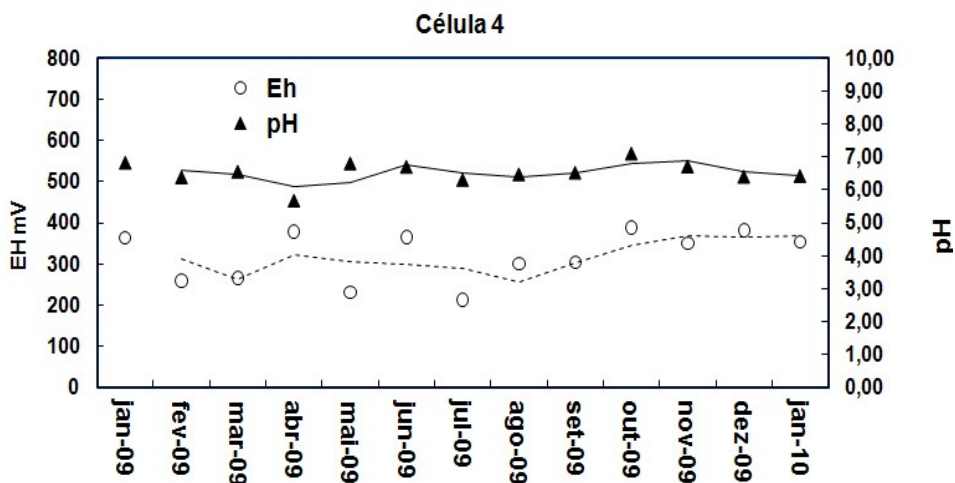
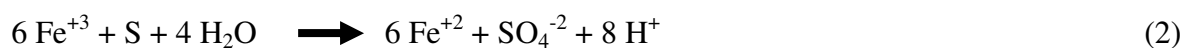


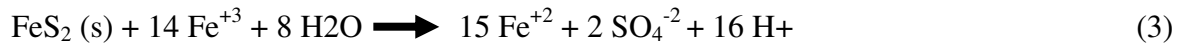
Figura 4 - Eh x pH do efluente percolado na célula 4 no ano de 2009.

A oxidação da pirita é um processo complexo no qual participam diversos tipos de reações de oxi-redução, hidrólise e formação de íons complexos, controles de solubilidade e efeitos cinéticos (Souza, 1995). Há dois mecanismos de oxidação que participam do processo de oxidação da pirita: o biológico e o químico. Sob condições ótimas de temperatura e pH, a velocidade das reações assistidas pela presença de bactérias são várias vezes superiores (10^5 a 10^8 vezes) às promovidas pelo mecanismo químico (Souza, 1995).

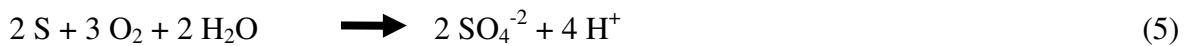
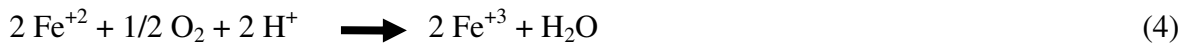
Em um meio com pH pouco abaixo de 3, os íons Fe^{+3} podem reagir com a pirita de acordo com a Eq. (1) e com o enxofre conforme a Eq. (2).



Para um meio mais ácido onde é reduzida a concentração de O₂, os íons Fe⁺³ passam a atuar como o principal oxidante da pirita, e a reação global é dada pela Eq. (3).



A oxidação da pirita pela ação dos íons Fe⁺³ ocorre até cem vezes mais rapidamente do que com o oxigênio. As Eqs. (4) e (5) representam as reações mediadas pela presença de bactérias.



Tais reações, quando mediadas por bactérias, representam a etapa determinante de velocidade da oxidação da pirita em meios com pH abaixo de 3,0 (Stum e Morgan, 1996; Edwards *et al.*, 2000 *apud* Souza *et al.*, 2010). No caso da célula 1, em que o valor do pH do efluente é próximo a 1,0 as reações químicas da drenagem ácida são aceleradas devido a presença das bactérias.

A partir das faixas de variações dos valores de pH e Eh determinados nos efluentes das células 1 e 4, foi possível localizar as áreas onde se situam os dois efluentes no diagrama pH x Eh (Levison, 1980 *apud* Ritcey, 1994). Este diagrama apresenta as condições que ocorrem na natureza (Figura 5). Observa-se nitidamente que o efluente da célula 1 (sem cobertura) está localizado em uma região de oxidação, enquanto que o efluente gerado na célula 4 apresenta características semelhantes de água de rios (ponto 5).

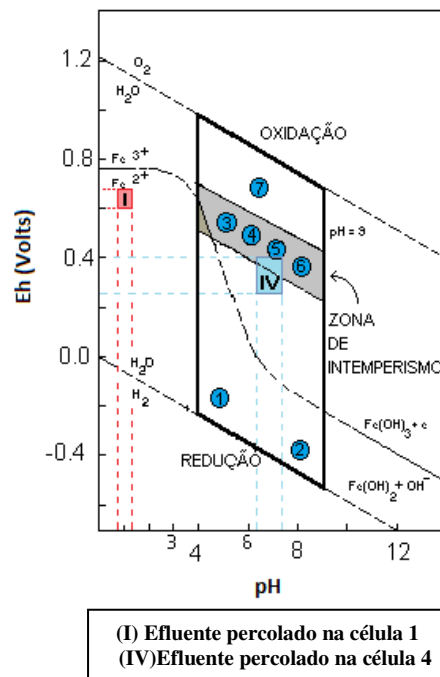


Figura 5 - Representação esquemática do diagrama Eh - pH Fe - H₂O .

Obs.: Os números indicam os demais ambientes: (1) pântanos e solos encharcados; (2) sedimentos marinhos redutores; (3) águas ácidas de mina; (4) chuva; (5) águas dos rios; (6) água dos oceanos; (7) depósitos de sulfetos de chumbo oxidados (Levinson, 1980, *apud* Ritcey 1989).

O conhecimento das temperaturas nas camadas de rejeito é um dado importante. Temperaturas relativamente mais elevadas são um indicativo da atuação das bactérias aeróbicas principalmente do gênero *Thiobacillus*.

A Figura 6 apresenta os dados de temperaturas para as células 1 e 4, que foram obtidos através de sensores instalados em ambas as células no interior do rejeito grosso a 1m de profundidade. Na célula 1 foram registrados valores de temperatura entre 30 a 45°C, sempre superiores aos valores de temperatura da célula 4 que situaram-se entre 20 e 25°C. As maiores temperaturas medidas na célula 1 podem ser creditadas à ocorrência de reações exotérmicas de oxidação catalisadas por bactérias. No caso da célula 4, as temperaturas oscilaram em valores próximos aos da temperatura média ambiente.

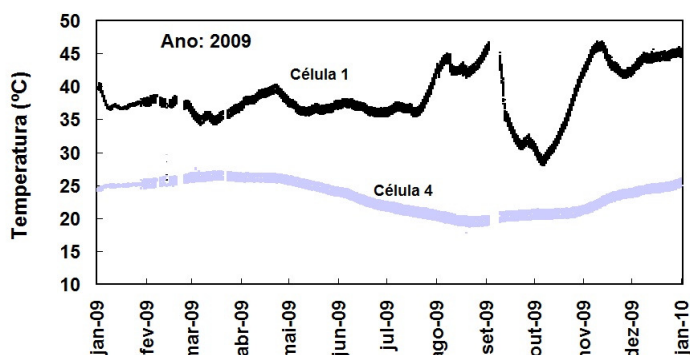


Figura 6 - Temperatura no rejeito grosso a 1 m de profundidade (ano 2009)

Na Tabela II são apresentadas características típicas das águas de drenagem ácida e seus impactos principais.

Tabela II. Características típicas das águas de drenagem ácida (Farfan *et al.*, 2004).

Parâmetro	Espécies químicas	Faixa de concentração	Impacto
Acidez	H ₂ SO ₄	pH (2,0 – 4,0)	Mobilização de íons
Ferro	íons Fe ⁺² , Fe ⁺³ , óxidos e hidróxidos	100 - 300 mgL ⁻¹	Turbidez da água
Metais Pesados	Cu, Mg, Zn, Cd, Hg, Pb, As	1 - 200 mgL ⁻¹	Redução da flora e fauna

A condutividade elétrica (CE) é a expressão numérica da habilidade de uma solução aquosa de transmitir corrente elétrica. Esta capacidade depende da presença de íons, da concentração total deles, mobilidade, valência, concentrações relativas e da temperatura. Pode-se observar na Figura 7 que a condutividade elétrica (mScm⁻¹) foi muito superior na célula sem cobertura, indicando uma maior quantidade de íons presentes na solução, como consequência dos baixos valores de pH (elevada acidez) o que objetivamente ocasionou a solubilização das espécies químicas como aquelas apresentadas na Tabela II, acrescidas de SO₄⁻² e Mn⁺².

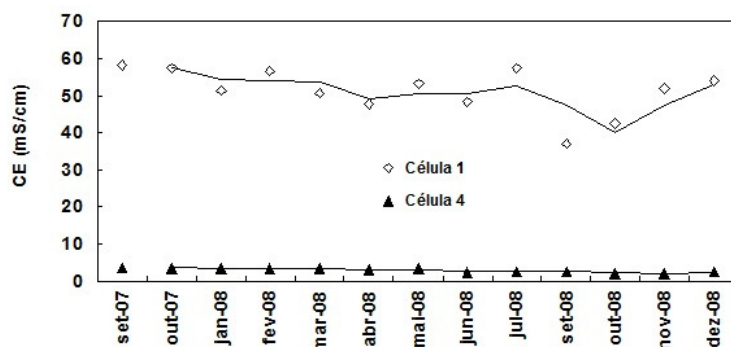


Figura 7 - Valores de condutividade elétricas nos efluentes percolados nas células 1 e 4 (ano:2009).

Adicionalmente aos parâmetros físico-químicos as Figuras 8 e 9 apresentam dados meteorológicos e de volume de água percolada nas células 1 e 4 no ano de 2009. A Figura 8 mostra as precipitações diárias e mensais em milímetros, registradas no ano de 2009, ano em que ocorreu o maior volume anual de chuva desde o início do monitoramento na unidade protótipo. Nota-se que, no início de janeiro, ocorreu uma precipitação diária de cerca de 100 mm. Além disso, nos meses de outubro e dezembro ocorreram precipitações diárias significativas (entre 60 e 70 mm).

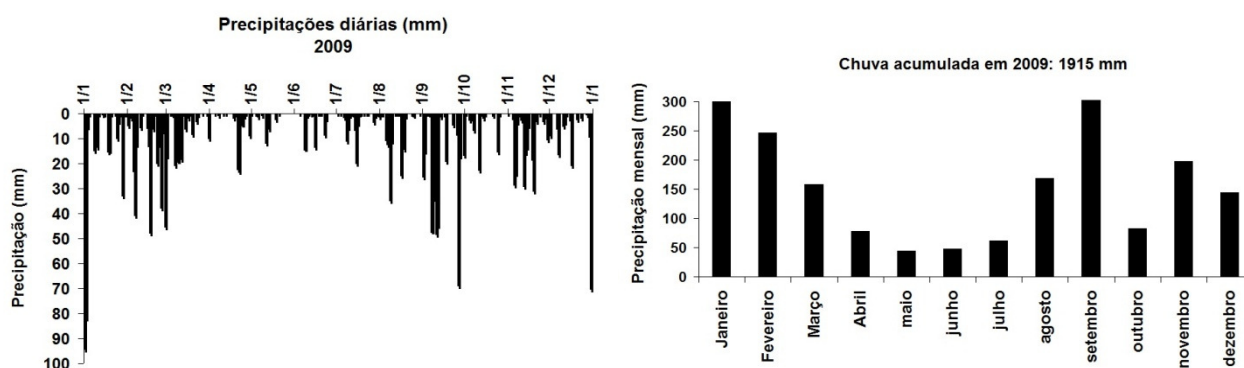


Figura 8 - Precipitações diárias e mensais do ano de 2009 medidas na unidade protótipo piloto.

A Figura 9 mostra os volumes acumulados dos efluentes que percolaram nos lisímetros das células 1 e 4, que representam uma parcela do efluente total percolado na célula. Observa-se que na célula 4, com a aplicação de uma barreira capilar dupla, há uma redução significativa (cerca de 90%) no volume de efluente percolado no rejeito quando comparado com o volume do efluente percolado no rejeito da célula 1. A aplicação da barreira capilar dupla sobre o rejeito da célula 4 levou à obtenção de um efluente percolado com valores de pH maior e valores de condutividade e potencial Redox menores que aqueles obtidos no efluente percolado na célula 1 (sem cobertura).

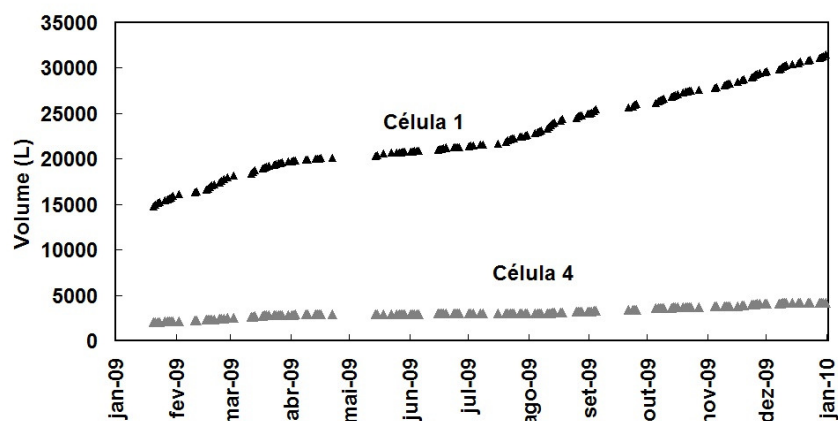


Figura 9 - Volumes acumulados percolados nos lisímetros das células 1 e 4 no ano de 2009

4. CONCLUSÕES

O presente artigo examina o desempenho de um sistema de cobertura seca projetado para a mitigação de drenagem ácida de mina em rejeitos do beneficiamento de carvão.

O desempenho é avaliado a partir da interpretação de dados físico - químicos e hidrológicos obtidos em uma unidade protótipo em escala piloto pioneira no Brasil, cuja operação teve início em outubro de 2007 no Estado de Santa Catarina e encontra-se ainda em andamento.

São apresentados dados físico-químicos, temperatura e dados hidrológicos relativos às águas percoladas em rejeitos de mineração de carvão considerando dois diferentes casos: (a) rejeito sem cobertura (célula 1) e (b) rejeito coberto com barreira capilar dupla (célula 4).

Os resultados obtidos revelaram um melhor desempenho da célula 4 em relação à célula 1 na minimização dos efeitos da drenagem ácida de minas. Isto se reflete na ocorrência de efluentes percolados com maior valor de pH e menores valores de Eh, CE e temperatura na célula 4 quando comparados aos da célula 1.

A barreira capilar projetada atuou também na redução do volume de efluente percolado. A célula 4 apresentou um volume cerca de 90% inferior ao volume de efluente percolado na célula 1.

A caracterização completa do mecanismo da drenagem ácida de mina vem sendo feita por meio da análise das espécies químicas presentes nas águas percoladas (ferro, sulfato, metais pesados, etc) que estão sendo monitoradas durante o período de operação da unidade protótipo piloto.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem especialmente ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, à Carbonífera Criciúma S/A e à Rede de Pesquisa Desenvolvimento Tecnológico e Inovação do Carvão Mineral - Rede Carvão.

6. BIBLIOGRAFIA

Adu-wusu C., Yanful E.K. Performance of engineered test covers on acid-generating waste rock at Whistle Mine, Ontario. *Canadian Geotechnical Journal* 43, pp 1-18, 2006.

Borghetti Soares A, Ubaldo M.O., Souza V.P., Soares P.S.M, Barbosa M.C., Mendonça .R.G. Design of a dry cover pilot test for acid mine drainage abatement in southern Brazil. Part 1: material characterization and numeric modeling. *Mine Water and the Environment* 28(3), pp 219-231, 2009.

Borghetti Soares A., Ubaldo M.O., Souza V.P., Soares P.S.M., Barbosa M.C., Mendonça R.G. Design of a dry cover pilot test for acid mine drainage abatement in southern Brazil. Part 2: Pilot Unit Construction and Initial Monitoring. Technical communication. *Mine Water and the Environment* 29(4), pp. 277-284, 2010.

Borma, L.S., Mendonça R.M.G., SOUZA, V.P. Processo de Mitigação da Formação de Drenagens Ácidas Utilizando Coberturas Secas. Projeto Básico da Unidade Piloto e da Instrumentação, Avaliação Preliminar dos Custos de Instalação e Operação de piloto, RT 2002-038-00 (Relatório técnico para o SIECESC), Rio de Janeiro, Brasil, 126p, 2002.

Borma, L.S., Mendonça R.M.G, Souza, V.P. Soares P.S.M. Utilização de cinza no contexto da reabilitação de áreas de mineração de carvão. Proc, 5th Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, CD ROM, Porto Alegre, Brasil, 2003.
CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução N^o 357 de 17 de março de 2005, MMA, 2005.

Farfan, J.R., Filho, B.O., Souza, V.P., Avaliação do Potencial de Drenagem Ácida de rejeitos da Indústria Mineral. Rio de Janeiro: CETEM, 58p., 2004.

GeoAnalysis - SoilCover softwares. University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 2000.

Heineck K.S., Consoli N.C., BICA A.V.D., Flores J.A.A. Utilização de Cinzas de Carvão Visando sua Aplicação como material Geotécnico. Proc, 5th Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, CD ROM, Porto Alegre, Brasil, 2003.

MEND. Dry Covers. Mend Manual 5.4.2d Prevention and Control. In: Tremblay GA, Hogan CM (eds), Vol.4, pp. 155-232, 2001.

O'Kane M.A., Ayres B.K., Christensen D., Meiers G. CANMET-CETEM Manual on cover system design for reactive mine waste. Report 689-01 prepared for CANMET-CETEM, 2002.

Ritcey, C.M. Tailings Management: problems and solutions in the mining industry. Amsterdam: ELSEVIER, 1989, Process Metallurgy, v. 6.

Souza V.P., Soares P.S.M, Possa M.V., Santos M.D.C., Dalmina L.B., Mello M.C., Ubaldo M.O., Borghetti Soares A., Trindade R.B.E., Bertolino A.V.F.A., Borma L.S., Mendonca R.G., Almeida J.R., Krebs A.S.J., Schneider C.L., Schneider C.H. Relatório técnico final do Projeto Otimização do processo de geração de energia elétrica a partir do carvão e recuperação ambiental das áreas degradadas pela mineração. CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, 2007.

Souza V.P. Drenagens Ácidas do Estéril Piritoso de Mina de Urânio de Poços de Caldas: Interpretação e Implicações Ambientais. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica Universidade de São Paulo, 1995, 143p.

Souza V.P., Possa, M.V., Soares, P.S.M., Borghetti Soares, A., Bertolino, A.V.F.A., Souza, M.R.R. Desempenho de cobertura seca em escala piloto para abatimento de DAM gerada por rejeito de carvão. Proc, 23rd ENTMME, Gramado, RS, Brasil, vol. 2, pp. 515-523, 2009.

Souza C.M.B. Modelagem e simulação da drenagem ácida de mina em colunas. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brasil. 67 pp., 2010.

Ubaldo M.O. Uso de Cinza de Carvão na Composição de uma Cobertura de Rejeitos de Mineração. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, RJ, Brasil, 150p. 2005.