

Experimento para Determinação do Desempenho de Sistemas de Cobertura no Campo

Ney Rosario Amorim

Geoestrutural Consultoria e Projetos Ltda, Belo Horizonte, Brasil,
ney.amorim@geoestrutural.com.br

Roberto Francisco de Azevedo

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, razevedo@ufv.br

Osmar Ferreira

Rio Paracatu Mineração, Paracatu, Brasil, osmar.ferreira@rpm.kinross.com.br

André Geraldo Cornelio Ribeiro

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, andregcribeiro@yahoo.com.br

RESUMO: A empresa Rio Paracatu Mineração (RPM) atua há cerca de 20 anos na produção de ouro, no município de Paracatu-MG, com a mais baixa relação material escavado/minério do mundo, em média 0,45g de minério para 1,0t de material escavado. No momento, viabiliza-se um projeto de expansão que estenderá a vida útil da mina por mais 20 anos. O ouro está presente no minério lixiviado e também está associado a arsenopirita, a pirita e a calcopirita. Existe, no entanto, uma grande preocupação em relação ao fechamento das áreas lavradas, da barragem de rejeitos e dos tanques específicos para evitar a formação de drenagem ácida de mina. A RPM tem investido em pesquisas sobre sistemas de coberturas que atendam a essa necessidade. Nesse sentido, montou-se um experimento monitorado no campo para simular o balanço hídrico no local da mineração. O presente trabalho descreve o experimento montado, bem como a sua instrumentação.

PALAVRAS-CHAVE: Cobertura, Rejeitos, Descomissionamento, Lisímetros.

1 INTRODUÇÃO

Anualmente a indústria de mineração explora centenas de milhões de toneladas de solo e rocha para extrair minerais que, após beneficiamento, servem para a produção de uma enorme quantidade de produtos fundamentais para a civilização moderna (Carrier III et alli 1983).

Freqüentemente, a maior parte do material explorado é resíduo, estéril e/ou rejeito. Em alguns casos, como na mineração de cobre ou ouro, os rejeitos podem representar mais de 99% do minério.

Quando nos resíduos de mineração existem minerais sulfetados, em presença de água esses minerais são oxidados gerando uma solução aquosa ácida denominada de drenagem ácida de minas (DAM). Trata-se de um dos mais graves impactos ambientais associados a essa atividade

de mineração.

A empresa Rio Paracatu Mineração (RPM) atua há cerca de 20 anos na produção de ouro, no município de Paracatu, em Minas Gerais. A produção apresenta a mais baixa relação material escavado/minério do mundo: em média 0,45 g de minério para 1,0 t de material escavado. Até meados de 2007, a RPM operava em um sistema não convencional de lavra a céu aberto que permite explorar o Morro do Ouro sem que sejam produzidos estéreis. A mineração iniciou com a produção anual de 6,0 Mt. Em expansões sucessivas ocorridas em 1995, 1997 e 2001 a produção passou para 18,0 Mt/ano.

Nesse processo de beneficiamento do minério, o ouro e os minerais sulfetados são concentrados em três estágios. Os rejeitos desse processo (30% em peso) contêm 20% a 30% de sulfetos e são depositados de forma subaquática

em pequenos reservatórios revestidos por um liner de argila e/ou geomembrana PEAD denominados de “tanques específicos”. Adiciona-se cal a esses rejeitos para manter o seu PH entre 6 e 7. Os rejeitos de flotação (cerca de 70% em peso) são parcialmente divididos em dois espessadores para a recuperação de água. A porção grosseira (underflow), com 30% de teor de sólidos, é enviada por gravidade para o reservatório da barragem de rejeitos que tem cerca de 800,0 ha. Calcário britado é adicionado a esses rejeitos da flotação para melhorar as suas características geoquímicas após deposição.

O ouro está presente no minério lixiviado e também está associado a arsenopirita (FeAsS), a pirita (FeS₂) e a calcopirita (CuFeS₂). Existe, portanto, uma grande preocupação em relação ao fechamento das áreas lavradas para evitar a formação de drenagem acida de mina (DAM).

No momento, está sendo viabilizado um projeto de expansão que passará a produção para 80 Mt/ano e estenderá a vida útil da mina por mais 20 anos. Entretanto, nessa expansão, o Morro do Ouro se tornará uma cava com cerca de 350 m de profundidade. A lavra da zona mineralizada exigirá o decapeamento de, no mínimo, 200 m de material (horizonte A) gerando, portanto, um volume considerável de estéril. Esse novo plano de lavra mudará significativamente o plano de fechamento da mina, introduzindo a necessidade de descomissionamento não só das áreas lavradas, da barragem de rejeitos e dos tanques específicos, mas também da cava e da pilha de estéril de 200 Mt que será gerada.

Nesses casos, sistemas de coberturas com solo terão que ser usados com o objetivo de minimizar a entrada de oxigênio e água nas áreas lavradas, nos tanques específicos, no reservatório da barragem de rejeitos e na pilha de estéril rochoso.

1.1 Objetivos

Em vista da necessidade da RPM estudar sistemas de cobertura com solo e o interesse científico nesses estudos, procurou-se viabilizar junto à empresa experimentos *in situ*, monitorados. Foram, então, projetados e construídos dois sistemas de coberturas

experimentais um do tipo prescritivo e, o outro, do tipo evapotranspirativo, ambos com sistema de monitoramento composto por medidores de escoamento superficial, lisímetros para medir a infiltração e instrumentação geotécnica para monitorar perfis de umidade nas diferentes camadas de solo.

Estes experimentos foram implantados numa região chamada de “barraginha” cujo reservatório serviu para receber os rejeitos provenientes da operação da planta piloto da mina.

A partir dos resultados obtidos com estes experimentos, pretende-se estudar o balanço hídrico dos sistemas de cobertura (precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração, infiltração, etc.) bem como conhecer os perfis de umidade presentes no sistema de cobertura. Estes dados serão coletados por um período de, pelo menos, um ano e servirão para comparações com análises numéricas dos experimentos, inicialmente calibradas a partir de ensaios geotécnicos de laboratório feitos com os diferentes materiais dos sistemas de cobertura.

A RPM viabilizou a construção dos lisímetros bem como a compra e instalação de uma instrumentação inicial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sistemas de coberturas são utilizados principalmente para reduzir a quantidade de água que infiltra nos resíduos, controlar a migração de gases e isolar os resíduos do meio ambiente (Abichou et alli 2004; O’Kane e Barbour 2003; Koerner and Daniel 1997; etc.).

Os sistemas de cobertura são, normalmente, divididos em dois tipos: prescritivos e evapotranspirativos. As *coberturas prescritivas* utilizam dos princípios de resistência ao fluxo, ou seja, camadas com baixa condutividade hidráulica (argilas compactadas com ou sem geomembrana ou GCL) para minimizar a infiltração e maximizar o escoamento superficial e a evapotranspiração. Os componentes básicos da cobertura prescritiva são, uma camada de solo com maior teor de matéria orgânica, apropriado para o plantio, e uma camada barreira feita com solo

compactado de baixa condutividade hidráulica que estaria por cima do material a ser coberto. A vegetação, além da função estética, tem os objetivos de garantir a proteção da camada de cobertura contra agentes erosivos e aumentar a evapotranspiração. A camada barreira, como o próprio nome sugere, tem a função de impedir (minimizar) a passagem de líquidos. As *coberturas evapotranspirativas* consistem em uma camada de solo com maior teor de matéria orgânica, apropriado para o plantio de uma cobertura vegetal, sobreposta a uma camada de solo pouco compactado que tem a função de armazenar os líquidos que se infiltram durante o período de chuvas. Os rejeitos a serem cobertos podem ficar abaixo dessa camada de armazenamento de líquidos. Durante o período de chuvas essa camada vai, progressivamente, saturando sem, entretanto, permitir que uma quantidade significativa de líquidos alcance os rejeitos. Assim que precipitação cessa ou diminui, a evapotranspiração passa a predominar e vai, também progressivamente, secando, diminuindo a saturação da camada de armazenamento até que o próximo período chuvoso recomeça e os processos de armazenamento e secagem dessa camada se repetem. Portanto, nesse caso, a camada de solo ao invés de “impedir” a passagem de líquido, funciona como uma “caixa de água” que enche durante os períodos chuvosos e esvazia durante os períodos de estiagem.

A(s) camada(s) de armazenamento são constituídas por areias silteosas, siltes e/ou siltes argilos, e devem ser suficientemente espessa(s) para que o acréscimo de umidade não ocorra próximo a base onde se encontra o material que se pretende proteger. A(s) espessura(s) necessária(s) dependem das condições climáticas (evaporação), do tipo de vegetação usado na camada de cobertura vegetal (transpiração), das propriedades não saturadas do(s) solo(s) (condutividade hidráulica e curva de retenção de água) e do escoamento superficial.

Existem dois tipos básicos de coberturas evapotranspirativas: monolíticas e barreiras capilares. As *coberturas evapotranspirativas monolíticas* já foram descritas anteriormente. As *coberturas evapotranspirativas com barreiras capilares* utilizam um sistema em que

a camada de armazenamento é sobreposta a uma camada de material com granulometria mais grossa (Qian et al. 2002). Essa camada de material com partículas maiores serve para aumentar a capacidade de armazenamento da camada de solo mais fino (Fig. 1).

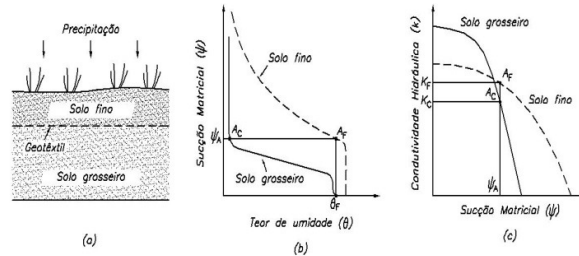


Figura 1.(a) Barreira Capilar, (b) Curva de retenção de água no solo, (c) Condutividade Hidráulica (adaptado de Qian et. Alli, 2002).

Assim, na Figura 1b, observa-se que quando a frente de infiltração atinge a base do solo fino (camada de armazenamento) seu teor de umidade é igual a A_f correspondendo, aproximadamente, ao valor de entrada de ar do solo e a sucção igual (ψ_a). Devido as diferentes características das curvas de retenção de água dos solos finos e mais grosso, para essa mesma sucção o solo grosseiro terá uma umidade A_c , bem menor do que a do solo mais fino. Em vista dessa diferença de umidade, o solo grosseiro terá uma condutividade hidráulica menor do que a do solo fino, Figura 1c, e funcionará como um contorno quase impermeável para a camada de solo fino, possibilitando um melhor aproveitamento da sua capacidade de armazenamento.

Segundo Dwyer 2003 e Carlsson 2002, existem dois problemas principais com relação à barreira capilar. Um é que o solo fino não deve colmatar o solo grosseiro. Nesse caso, o uso de um geotêxtil como elemento de separação é recomendável. O segundo problema está relacionado com períodos de precipitações extremamente elevadas. Em tais situações, a barreira capilar pode parar de funcionar, uma vez que quando o solo grosso satura ou chega próximo da saturação, sua condutividade hidráulica fica bem maior que a do solo fino (“quebra da barreira capilar”).

Nyhan et al. 1990, e Khire et al. 1994, afirmam que as barreiras capilares têm sido

mais efetivas que as convencionais, são mais facilmente construídas e custam menos que as coberturas prescritivas.

Há certa controvérsia sobre a efetividade das barreiras capilares quando relacionadas com as condições climáticas. Segundo Benson e Khire 1995, estudos de campo têm mostrado que barreiras capilares com duas camadas são efetivas em regiões áridas e semi áridas. Além disto, projetos mais complexos com mais de duas camadas têm funcionado bem em regiões úmidas. Por outro lado, Morris and Stormont 1997 comentam que barreiras capilares não são eficientes em condições climáticas de moderada a elevadas precipitações, sendo indicadas para ambientes áridos e semi-áridos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados na região denominada “barraginha”, local que era utilizado para o lançamento de rejeitos durante a operação da usina piloto da mina que esteve em operação por 10 anos. Os rejeitos ali depositados formavam uma camada com espessura variando de 0 a 2,5 m que não tinha capacidade para suportar o tráfego das máquinas que construiriam os experimentos. Por esse motivo, sobre a camada de rejeitos, foi construída uma camada de solo compactado, denominada de camada de trafegabilidade.

Estudou-se o desempenho de dois experimentos, conforme apresentados a seguir:

- Experimento 1 - Cobertura Prescritiva: composta por uma camada de 15 cm de solo orgânico que se sobrepõem a uma camada de 50 cm de material siltoso que, por sua vez, é sobreposta a uma camada de 50 cm de argila compactada (barreira hidráulica).
- Experimento 2 – Cobertura Alternativa: composta por uma camada de 15 cm de solo orgânico que se sobrepõem a uma camada de 50 cm de material siltoso que, por sua vez, é sobreposta a uma camada de 50 cm de cascalho (barreira capilar).

O projeto dos lisímetros pode ser observado

nas Figuras 2 e 3. Foram instalados três medidores de umidade (TDR) em cada experimento, conforme apresentado esquematicamente na Figura 3.

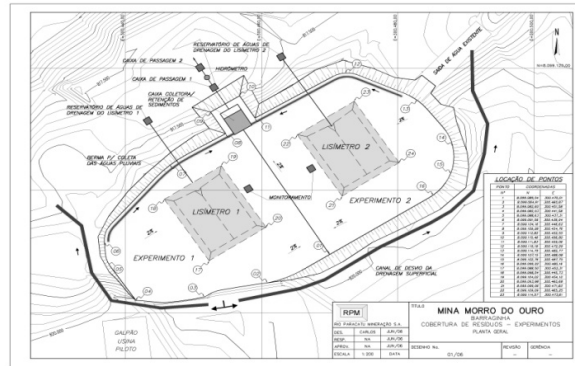


Figura 2 - Arranjo Geral dos Experimentos

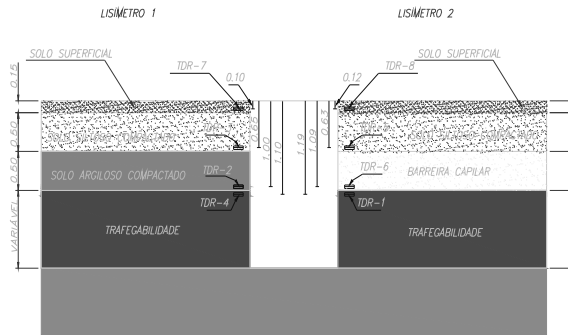


Figura 3 – Detalhe da Instrumentação (TDR) nos Lisímetros.

As Figuras 4 e 5 apresentam o experimento em construção e em operação, respectivamente.



Figura 4 – Vista geral da construção dos experimentos



Figura 5 – Vista dos experimentos já com a instrumentação instalada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Além da apresentação dos experimentos implantados no campo, foi possível apresentar aqui alguns resultados preliminares dos perfis de umidade medidos nos solos da cobertura através dos equipamentos TDRs.

As Figuras 6 e 7 apresentam os perfis de umidade variando com o tempo, nos experimentos 1 e 2, respectivamente. Cada inflexão das curvas representa um equipamento.

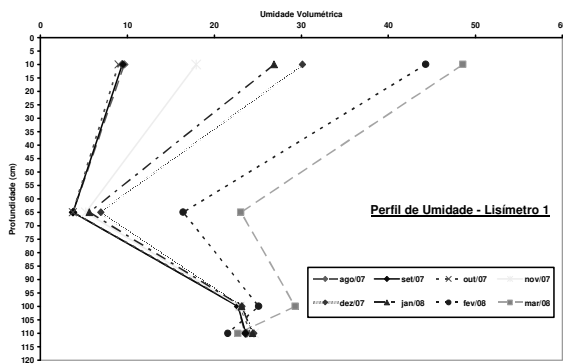


Figura 6. Perfis de Umidade no Experimento 1 em diferentes tempos.

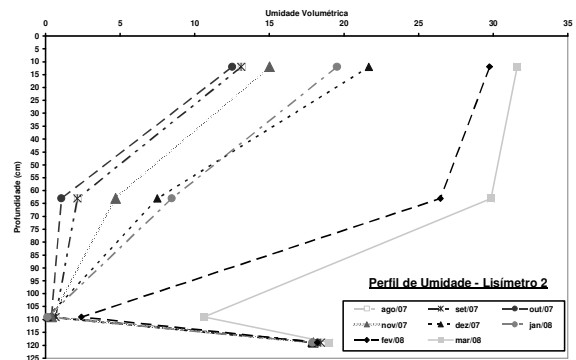


Figura 7. Perfis de Umidade no Experimento 2 em diferentes tempos.

Analisando os gráficos apresentados nas Figuras 6 e 7, é possível observar que as maiores variações de umidade ocorrem nos sensores mais superficiais 7 e 3, lisímetro 1 e 4 e 5, lisímetro 2 que acompanharam a precipitação.

As Figuras 8 e 9 apresentam a variação da umidade volumétrica com o tempo, associada a precipitação medida, para os experimentos 1 e 2, respectivamente.

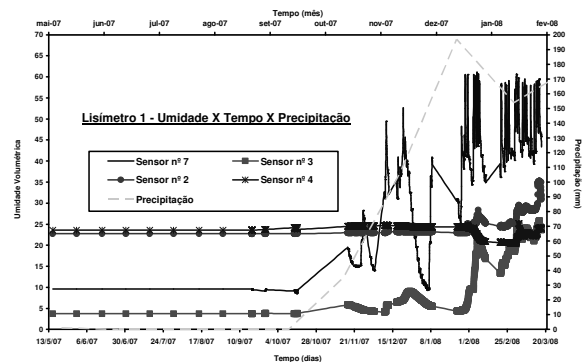


Figura 8. Variação da Umidade Volumétrica com o tempo e com a Precipitação, para o Experimento 1.

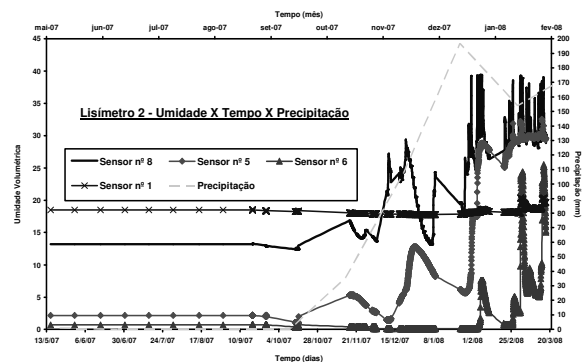


Figura 9. Variação da Umidade Volumétrica com o tempo e com a Precipitação, para o Experimento 2.

Analisando as Figuras 8 e 9, é possível observar que de maio a outubro a umidade se manteve constante, só começando a variar com o início das chuvas.

Nota-se, também, que o sensor 6 na base da barreira capilar umedece bastante (mais de 26%), enquanto que o sensor 2 na base da camada restritiva umedece bem menos (cerca de 14%). No entanto, os sensores 1 e 4 no topo da camada de trafegabilidade sofrem apenas pequenas variações de umidade o que parece indicar que os dois sistemas de cobertura estão funcionando a contento, pelo menos no que diz respeito à infiltração das águas pluviais.

5 CONCLUSÕES

Existe uma grande dificuldade em se conhecer o desempenho de coberturas de aterros construídas com solos. De acordo com a bibliografia consultada, uma das formas mais eficientes de se fazer isto é através da construção e monitoramento de coberturas em grandes escalas em que os lisímetros servirão para medida do percolado que atravessa a cobertura.

Trata-se de um método amplamente utilizado em países desenvolvidos mas ainda pouco difundido no Brasil.

A grande vantagem desta metodologia de projeto de coberturas quando comparada com a convencionalmente aplicada, é que os parâmetros a serem considerados nas análises são locais, o que influencia sobremaneira na avaliação do desempenho destas estruturas.

Outro fato importante que está sendo investigado no local dos testes é o desempenho das coberturas evapotranspirativas no que diz respeito a capacidade das mesmas em reservarem as águas nas camadas superficiais da cobertura e liberá-las para a atmosfera pela evapotranspiração.

Caso este tipo de cobertura seja considerado adequado às condições do local, isto poderá representar uma economia enorme a empresa RPM, uma vez que a mesma terá que cobrir áreas muito extensas durante o descomissionamento da mina. Este tipo de cobertura além de custar menos que a

convencional, praticamente não tem manutenção na medida em que não barra o fluxo mas, atua exatamente como a natureza, permite que as águas infiltrem e evapotranspirem, sem que as mesmas atinjam os resíduos.

AGRADECIMENTOS

À empresa Rio Paracatú Mineração – RPM, que viabilizou e financiou a implantação dos experimentos;

REFERÊNCIAS

- Abichou, T. et alli (2004) *Design of Cost Effective Lysimeters for Alternative Landfill Cover Demonstrations Projects* FAMU – FSU College of Engineering State University System of Florida, Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, University of Florida, 88 p.
- Benson, C. H. and Khire, M. V., (1995) “*Earthen Covers for Semiarid and Arid Climates*,” Landfill Closures – Environmental Protection and Land Recovery, ASCE, Geotechnical Special Publication, No. 53, R. Jeffrey Dunn and Udai P. Singh, Eds., New York, NY, p. 201-217.
- Carlsson, E. (2002), *Sulphide-Rich Tailings Remediated by Soil Cover*, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Sweden.
- Carrier, W. D., Bromwell, L. G., and Somogyi, F (1983), Design Capacity of Slurried Mineral Waste Ponds, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 109, No. GT5, p. 699-716.
- Dwyer, F. S. (2003), *Water Balance Measurements and Computer Simulations of Landfill Covers* Doctoral Thesis, The University of New Mexico, USA.
- Khire, M., C. Benson. and P. Bosscher. 1994. Final Cover Hydrologic Evaluation-Phase III, *Environmental Geotechnics*, University of Wisconsin-Madison
- Koerner, R. M. and Daniel, D. E. (1997). *Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps*. ASCE Press, Reston, Va.
- Morris and Stormont (1997), *Capillarity Barriers and Subtitle D Covers: Estimating Equivalency*, Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 123, N. 1, p. 3-10.
- Nyhan, J. W., T. E. Hakonson and B. J. Drennon. (1990). A water balance study of two landfill cover designs for semiarid regions. *J. Environmental Quality*, 19:281- 288.
- O’Kane, M. and Barbour, S. L. (2003) Predicting Field Performance of Lysimeters Used to evaluate Cover Systems for Waste. *6th ICARD*, Cairns, QLD, p. 327-339.
- Qian, Xuede; Koerner, Robert M. and Gray, Donald H.

(2002) "Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction", in *Michigan Department of Environmental Quality*, Waste Management Division, USA, p 399-437