

# Análise numérica de sistemas de cobertura na mina Rio Paracatu Mineração (RPM)

André Geraldo Cornélio Ribeiro  
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, andre.ribeiro@ufv.br

Roberto Francisco de Azevedo  
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, razevedo@ufv.br

Ney Rosário Amorim  
Geoestrutural Ltda, Belo Horizonte, Brasil, ney.amorim@geoestavel.com.br

Aline Fernandes Heleno  
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, a\_heleno@uol.com.br

**RESUMO:** O presente trabalho teve como objetivo apresentar a análise numérica de sistemas de cobertura construídos na região da antiga “Barraginha”, localizada na área da Rio Paracatu Mineração (RPM) em Paracatu-MG. Foram projetados e construídos dois sistemas de coberturas experimentais do tipo evapotranspirativos, um com e, o outro, sem, uma camada de barreira capilar, ambos com sistema de monitoramento composto por medidores de escoamento superficial, lisímetros para medir a infiltração e instrumentação geotécnica para monitorar a umidade e a sucção nas diferentes camadas de solo. Os experimentos foram acompanhados desde junho de 2007. Paralelamente a essa atividade de campo, realizou-se no laboratório um extenso programa de ensaios que compreendeu ensaios de caracterização, compactação, permeabilidade saturada e determinação da curva de retenção de água dos solos que compuseram as camadas de cobertura. Com os parâmetros obtidos em laboratório e os dados climáticos, montou-se um modelo numérico 2D contendo os dois sistemas de cobertura utilizando o programa VADOSE/W do pacote GeoSlope. A partir dos resultados obtidos no campo, apresenta-se nesse artigo os perfis de umidade medidos no campo ao longo do tempo comparando-os com os obtidos pela análise numérica. Observou-se uma boa aproximação dos resultados da análise numérica com os resultados de campo em ambos os sistemas de cobertura, principalmente para as camadas superiores. Logo, concluiu-se que, este modelo pode ser viabilizado para o dimensionamento de sistemas de cobertura com solos que atendam às necessidades da RPM e de outras mineradoras da região.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sistemas de Cobertura, Análise Numérica, Solos Não-Saturados, Lisímetros.

## 1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que a maior parte do material explorado pelas indústrias de mineração 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 (Amorim 2008).

A empresa Rio Paracatu Mineração (RPM) atua há mais de 20 anos na produção de ouro, no município de Paracatu, em Minas Gerais. No 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”. 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.

Em 2009 viabilizou-se um projeto de expansão que passará a produção para 80 Mt/ano e estenderá a vida útil da mina por mais 20 anos. Com essa 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.

Vê-se, portanto, uma grande necessidade de sistemas de coberturas com solo com o objetivo de minimizar a entrada de oxigênio e água nas áreas lavradas, nos tanques específicos, reservatório da barragem de rejeitos e na pilha de estéril rochoso com potencial de geração de drenagem ácida, para minimizar o problema.

### 1.1 Objetivos

Em vista do exposto, viabilizou-se junto à RPM experimentos *in situ*, monitorados. Foram, então, projetados e construídos dois sistemas de coberturas experimentais, 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.

A partir desses dados, estudou-se o balanço hídrico dos sistemas de cobertura (precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração, infiltração, etc.) bem como obteve-se os perfis de umidade dos materiais presentes no sistema de cobertura. Estes dados já estão sendo

coletados por um período de aproximadamente dois anos e seis meses.

Com base nos resultados obtidos em campo, e dos ensaios geotécnicos de laboratório, o presente trabalho compara resultados numéricos obtidos com um modelo bi-dimensional dos sistemas de cobertura feito com o método dos elementos finitos, com os perfis de umidade obtidos em campo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Tipos de Sistemas de Cobertura

Os sistemas de cobertura são, normalmente, divididos em dois tipos: prescritivos e evapotranspirativos.

As coberturas prescritivas utilizam-se de camadas com baixa condutividade hidráulica (barreira hidráulica) para minimizar a infiltração e maximizar o escoamento superficial e a evapotranspiração. Os componentes básicos da cobertura prescritiva são uma camada de solo com teor de matéria orgânica apropriado para o plantio, sobreposta à camada barreira hidráulica, normalmente colocada sobre o material a ser coberto. A camada superior, além da função estética, tem os objetivos de garantir a proteção da camada de cobertura contra agentes erosivos, aumentar a evapotranspiração e minimizar o aparecimento de trincas na camada barreira.

As coberturas evapotranspirativas também utilizam uma camada de solo com teor de matéria orgânica apropriado para o plantio de uma cobertura vegetal. Entretanto, esta camada é sobreposta a uma camada de solo pouco compactado que, durante o período de chuvas, vai, progressivamente, saturando sem, entretanto, permitir que uma quantidade significativa de líquidos alcance a sua base. Assim que precipitação cessa ou diminui, a evapotranspiração passa a predominar e, progressivamente, vai secando e diminuindo a saturação da camada, até que o próximo período chuvoso recomece e os processos de armazenamento e secagem dessa camada se repetam. 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 e liberação (store and release) é (são) constituída (s) por areias siltosas, siltes e/ou siltes argilosos, e devem ser suficientemente espessa(s) para que o acréscimo de umidade não ocorra próximo à sua base onde normalmente se encontra o material que se pretende proteger. A(s) espessura(s) necessária(s) depende (m) das condições climáticas (evaporação), do tipo de vegetação usado na camada de cobertura vegetal (transpiração) e das propriedades não saturadas do(s) solo(s) (condutividade hidráulica e curva de retenção de água).

Existem dois tipos básicos de coberturas evapotranspirativas: *monolíticas* e *barreiras capilares*. As coberturas *evapotranspirativas monolíticas* já foram descritas anteriormente. Nas coberturas *evapotranspirativas com barreiras capilares* a camada de armazenamento é sobreposta a uma camada de material com granulometria mais grossa. Essa camada de material com partículas maiores serve para aumentar a capacidade de armazenamento da camada de solo mais fino. Observa-se na Figura 1b 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 ( $\psi_a$ ). Devido as diferentes características das curvas de retenção de água dos solos finos e mais grosso, para essa mesma sucção o solo grosso terá uma umidade  $A_c$ , bem menor do que a do solo mais fino. Em vista dessa diferença de umidade, o solo grosso 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.

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.

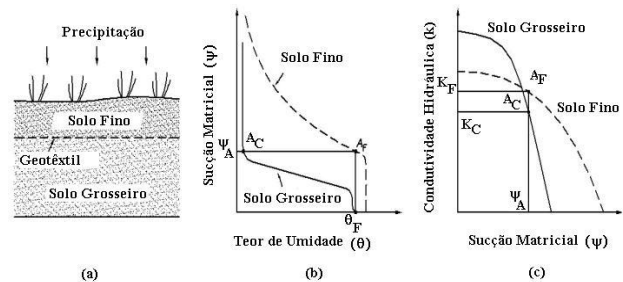


Figura 1.(a) Barreira Capilar, (b) Curva de retenção de água no solo, (c) Condutividade Hidráulica (adaptado de Qian et. Alli, 2002).

## 2.2 Trabalhos Realizados na RPM

A SRK do Canadá realizou um trabalho de monitoramento na cobertura do Tanque Específico III, na mina da RPM, em Paracatu (SRK, 2003 e SRK, 2005), que consistiu no seguinte:

- Montagem de uma estação meteorológica completa, automatizada, capaz de coletar dados da temperatura do ar, umidade relativa, velocidade dos ventos, direção dos ventos, radiação e precipitação.
- Monitoramento geotécnico através da instalação de instrumentos de medida de sucção e umidade no interior do reservatório e da cobertura do tanque específico III;
- Medição no campo, com o permeâmetro de Guelph, da condutividade hidráulica do solo usado na cobertura deste tanque.

Coleta de amostras de solo para a realização de ensaios geotécnicos tais como: teor de umidade, limites de Atterberg, peso específico, granulometria conjunta, curvas de retenção de água, condutividade hidráulica saturada, adensamento e compactação.

Modelagem unidimensional do sistema de cobertura do tanque específico III com o software SOIL COVER usando as condições climáticas monitoradas pela estação meteorológica e os dados obtidos pelos ensaios

de laboratório. Posteriormente, o modelo foi recalibrado utilizando os resultados obtidos do monitoramento do sistema de cobertura do tanque específico III. Os dados relativos à infiltração e escoamento superficial foram obtidos indiretamente uma vez que não foram construídos lisímetros para tal finalidade. A partir do modelo calibrado, foram simuladas algumas variações da cobertura e analisados os seguintes resultados:

- Os perfis de umidade do solo ficaram muito próximos daqueles medidos em campo e foram considerados satisfatórios pela equipe da SRK;
- Os resultados indicaram indiretamente que 45% da precipitação que caiu sobre a superfície do tanque escoaram e 31% infiltraram no solo da cobertura;
- Nos gráficos do teor de umidade volumétrica com o tempo observou-se, para cada instrumento, que o rejeito se encontrava quase saturado em todo o período de monitoramento o que ocasionou fluxo de baixo para cima em épocas de estiagem com a conseqüente ascensão dos sais para a superfície;
- A ineficiência da camada de cobertura como barreira para a passagem de oxigênio também foi comprovada pela saturação do solo de cobertura apresentar-se, em períodos de seca, abaixo de 80%, valor considerado o mínimo necessário para praticamente impedir a passagem de oxigênio;
- A partir de um gráfico “perfil de umidade volumétrica com a profundidade e com o tempo” para a cobertura existente, observou-se que acontecia a saturação do perfil com o início do período de chuvas e que esta condição era mantida ainda no período de seca, com a umidade maior que a inicial;
- Concluiu-se, através de simulações numéricas, que o aumento da espessura do solo de cobertura não traria vantagens significantes quanto à melhoria do desempenho da cobertura e no incremento da capacidade de armazenamento do solo.
- O modelo matemático confirmou que o escoamento superficial foi considerável na cobertura sem vegetação. O que poderia parecer vantagem, uma vez que indica menor quantidade de água se infiltrando pela cobertura, pode se tornar um problema na

medida em que este fato aumenta também a erosão superficial da cobertura. Simulações considerando uma “boa” cobertura vegetal indicam que o escoamento superficial se reduziria, mas essa redução seria compensada pelo acréscimo na transpiração, sem aumentar a infiltração.

Além da SRK, Amorim 2008 simulou os sistemas de cobertura descritos no presente trabalho com um modelo numérico unidimensional, e chegou as seguintes conclusões:

- Os dois sistemas de cobertura evapotranspirativos propostos praticamente não permitiram a passagem das águas pluviais para o rejeito;
- Em relação a evitar a passagem de oxigênio, o autor concluiu que o sistema de cobertura, que apresenta a camada de argila (barreira hidráulica), parece ser o que mais atende às necessidades da RPM;
- As variações de umidade volumétrica com o tempo medidas no campo nas diferentes camadas dos dois sistemas de cobertura não concordaram com as previstas pelo modelo numérico, de tal forma que, no campo, os solos estavam mais úmidos do que no modelo numérico.

Os resultados destes trabalhos serviram como base para a proposição e desenvolvimento desta pesquisa uma vez que as recomendações propostas foram incorporadas no presente trabalho.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Descrição do Experimento (Amorim, 2008)

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 durante cerca de 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 lançado, sem compactação, com aproximadamente 1,0 m de espessura, denominada de camada de trafegabilidade. Os dois sistemas de cobertura descritos a seguir foram construídos sobre essa camada de trafegabilidade.

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

O projeto do experimento pode ser observado nas Figuras 2 e 3. Foram instalados três medidores de umidade (WCR) em cada sistema de cobertura, conforme apresentado esquematicamente na Figura 3.

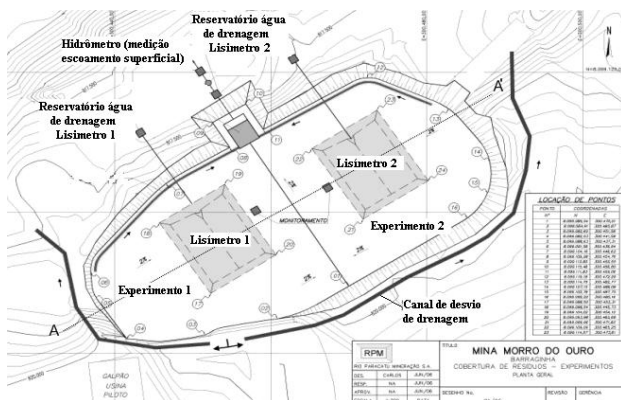


Figura 2 - Arranjo Geral do Experimento

### 3.2 Análise Numérica

A partir da sessão AA' (fig. 2), desenvolveu-se a malha de elementos finitos bidimensional dos sistemas de cobertura usando o programa VADOSE/W do pacote GeoSlope.

Este programa usa a solução de Darcy e Fick's para simular o transporte de água, calor e solutos através de uma variedade de meios saturados. É um programa de elementos finitos que utiliza o método de Penman-Wilson para calcular a evaporação real (AE) na superfície do sistema de cobertura, variando a função do potencial de evaporação em função da poro pressão do solo, e da temperatura e umidade do

ambiente.

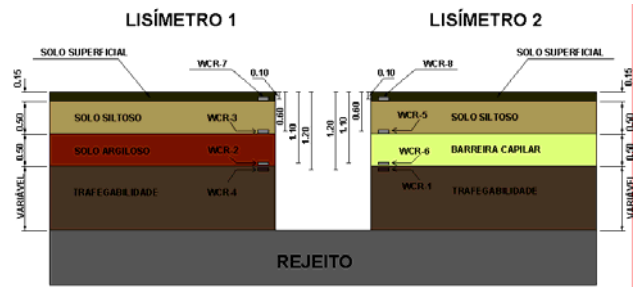


Figura 3 – Detalhe da Instrumentação (WCR) nos Lisímetros.

O VADOSE/W considera a precipitação, evaporação, acumulação de neve/gelo/escoamento superficial, percolação de água, congelamento e degelo, fluxo de vapor e transpiração real das plantas. Todos os parâmetros podem ser aplicados de forma semelhante atendendo às necessidades do local.

As características climáticas locais foram incorporadas ao modelo, bem como os parâmetros geotécnicos obtidos em laboratório através de ensaios de caracterização, permeabilidade saturada e obtenção da curva de retenção de água pelo método do papel filtro. Os parâmetros vegetais (índice de área foliar e comprimento das raízes) foram estimados, devido a diversidade de espécies existentes no local.

A Figura 4 ilustra a malha de elementos finitos, bem como as condições de contorno.

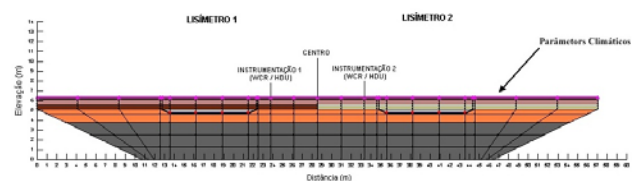


Figura 4 – Malha de Elementos Finitos e Condições de Contorno.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 5 a 12 apresentam uma comparação entre a umidade volumétrica medida em campo com a obtida pelo modelo ao longo do tempo para cada tipo de solo utilizado nos sistemas de cobertura.

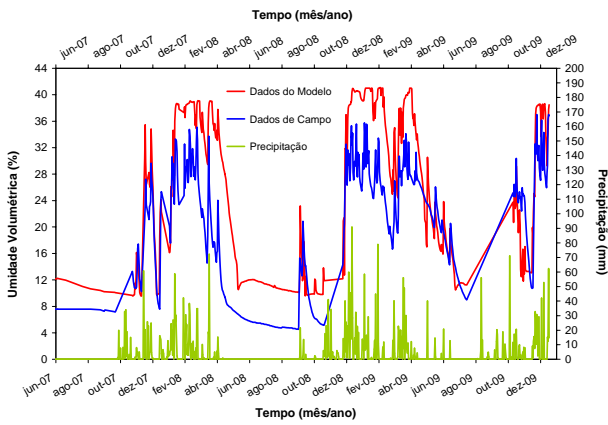


Figura 5 – Umidade Volumétrica X Tempo para a Camada de Solo Superficial (Cobertura 1).

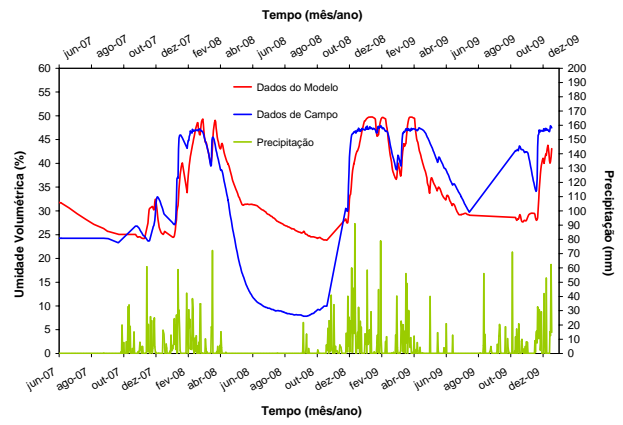


Figura 8 – Umidade Volumétrica X Tempo para a Camada de Solo Siltooso (Cobertura 2).

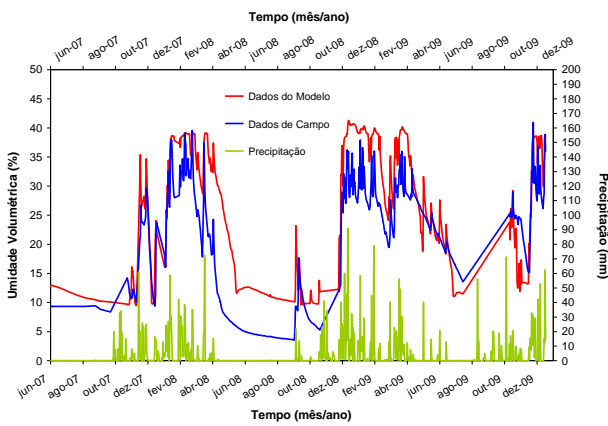


Figura 6 – Umidade Volumétrica X Tempo para a Camada de Solo Superficial (Cobertura 2).

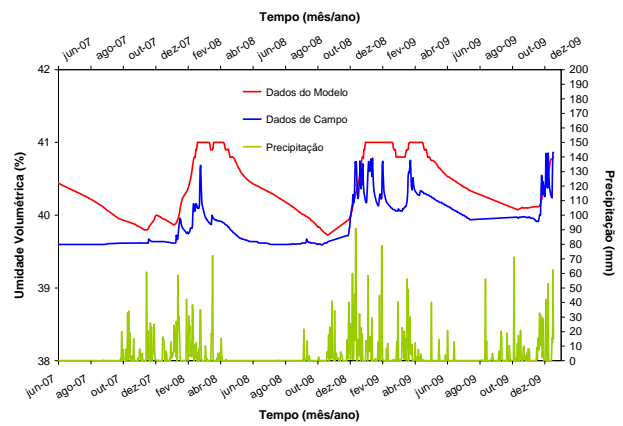


Figura 9 – Umidade Volumétrica X Tempo para a Camada de Solo Argiloso (Cobertura 1).

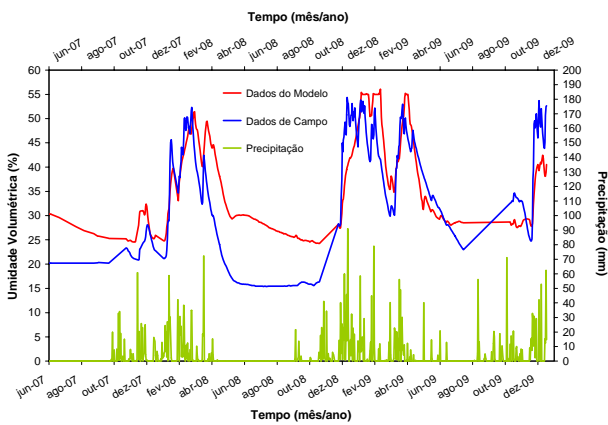


Figura 7 – Umidade Volumétrica X Tempo para a Camada de Solo Siltooso (Cobertura 1).

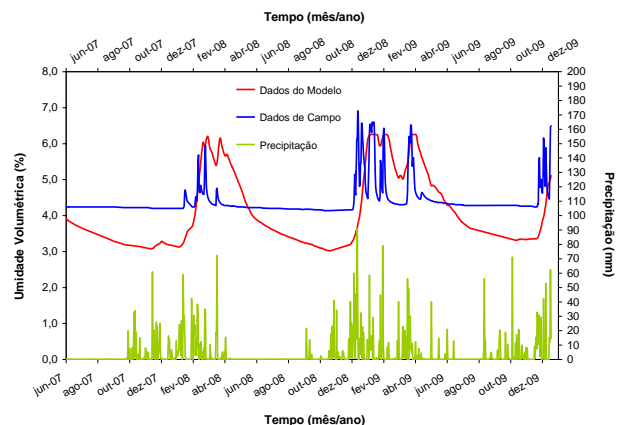


Figura 10 – Umidade Volumétrica X Tempo para a Camada de Barreira Capilar (Cobertura 2).

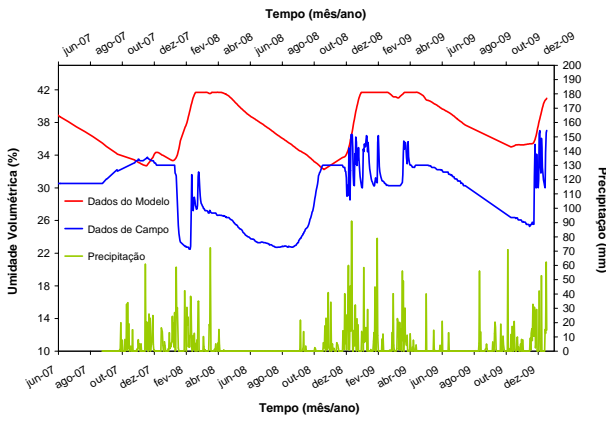


Figura 11 – Umidade Volumétrica X Tempo para a Camada de Trafegabilidade (Cobertura 1).

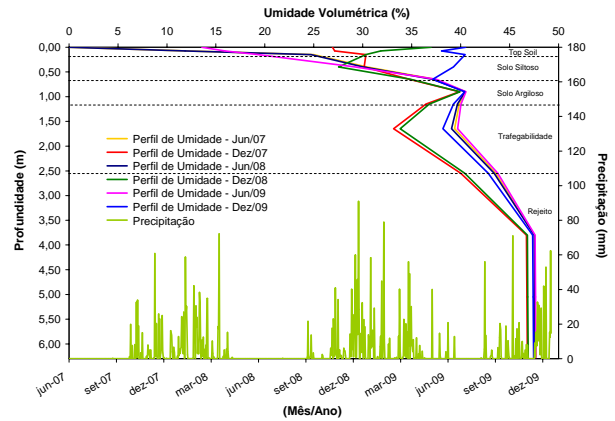


Figura 13 – Perfis de Umidade Referente ao Período de Junho/2007 a Dezembro/2009 (Cobertura 1).

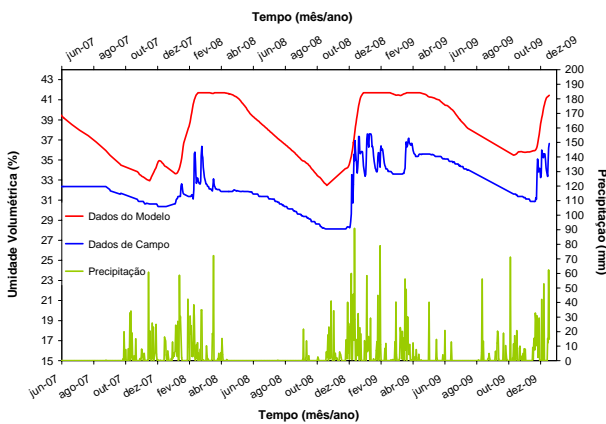


Figura 12 – Umidade Volumétrica X Tempo para a Camada de Trafegabilidade (Cobertura 2).

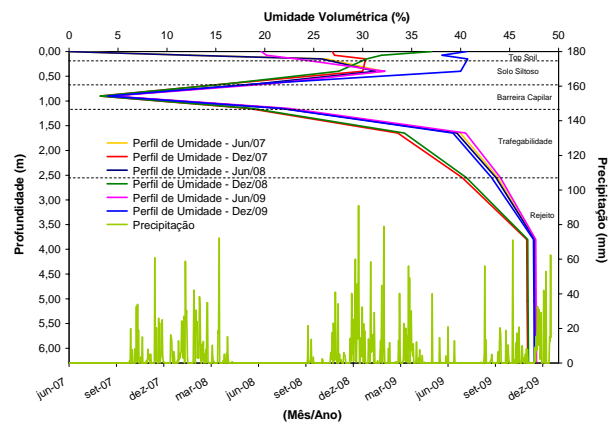


Figura 14 – Perfis de Umidade Referente ao Período de Junho/2007 a Dezembro/2009 (Cobertura 2)..

Observa-se nas Figuras 5 a12 que o modelo apresentou um resultado bastante coerente com os obtidos pela instrumentação de campo. No entanto, para as camadas mais profundas, principalmente a camada de trafegabilidade, verifica-se que valores de umidade volumétrica são maiores do que os de campo

As Figuras 13 a 16 apresentam comparações entre os perfis de umidade obtidos pelo modelo durante o período de análise.

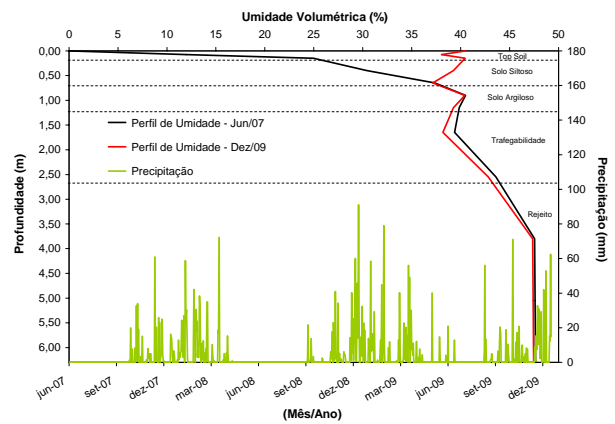


Figura 15 – Comparação dos Perfis de Umidade Junho/2007 e Dezembro/2009 (Cobertura 1).



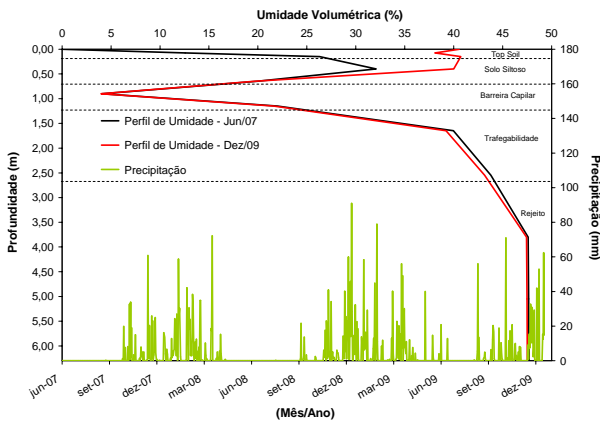


Figura 16 – Comparação dos Perfis de Umidade Junho/2007 e Dezembro/2009 (Cobertura 2).

Os perfis de umidade obtidos pelo modelo (Figuras 13 a 16), mostram que tanto para a Cobertura 1 quanto para a Cobertura 2, houve uma redução da umidade volumétrica na camada de trafegabilidade no período da análise.

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pela análise numérica dos sistemas de cobertura implantados na região da “Barraginha” localizada na RPM, pode-se concluir que:

- De uma maneira geral, os resultados numéricos apresentaram uma boa concordância com os resultados medidos no campo.
- Para as camadas mais profundas (Solo Argiloso, Barreira Capilar e Trafegabilidade), os resultados obtidos pelo modelo não foram tão próximos quanto os obtidos pelas camadas mais superficiais (Solo superficial e Solo Siltoso). Tal fato pode ser explicado por erro na calibração da instrumentação de campo (WCRs) para essas camadas, ou também pelo fato dos parâmetros vegetais (comprimento da raiz e índice de área foliar) terem sido estimados e por isso uma melhor resposta foi obtida para os solos superficiais.
- Entre os dois sistemas de cobertura utilizados, conclui-se que, do ponto de vista de infiltração, ambos funcionaram a contento, pois praticamente impediram que a infiltração das águas pluviais atingisse os rejeitos. Entretanto, o sistema com a barreira restritiva parece ser

mais adequado porque como a camada de barreira hidráulica permanece praticamente saturada ao longo do ano, ela também serve para impedir a passagem de oxigênio.

- Pode-se concluir que o modelo proposto apresentou ser uma excelente ferramenta para projetos de sistemas de cobertura, o que poderá representar uma economia enorme a empresa RPM, uma vez que a mesma terá que cobrir áreas muito extensas durante o descomissionamento da mina.

## AGRADECIMENTOS

À Rio Paracatu Mineração (RPM) e à FAPEMIG pelo financiamento do projeto de pesquisa ao qual resultou-se nesse trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Amorim, N.R. (2008). *Avaliação do desempenho de sistemas de cobertura na Mina Rio Paracatu Mineração (RPM)*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 143 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.
- Morris and Stormont (1997), *Capillarity Barriers and Subtitle D Covers: Estimating Equivalency*, Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 123, N. 1, p. 3-10.
- 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
- SRK Consulting. (2003). Rio Paracatu Mineração, Morro do Ouro, Closure Design Aspects, December 2003 Site Visit Report. Report to Rio Paracatu Mineração S.A., Brazil. Project Number IUR007.00, November
- SRK Consulting Engineers and Scientists (2005). “Rio Paracatu Mineração, Morro do Ouro, Conceptual Mine and Tailings Cover Design”. *Relatório interno da RPM*.