

Análise de um Sistema de Cobertura com Solo para um Lago de Rejeito por Análise Numérica (Vadose/W)

Thais Simões Coelho SOUZA ¹; Eduardo Antônio Gomes MARQUES ²;
Cleverson Alves de LIMA ³; Lais Emily ASSIS ⁴; Sady Júnior Martins da Costa de MENEZES ⁵;

Resumo – O objetivo deste trabalho foi a simulação de quatro modelos numéricos (I,II, III, IV) de sistemas de coberturas evapotranspirativas e prescritivas para descomissionamento de reservatórios de barragens, com a finalidade de minimizar o processo de formação da Drenagem Ácida de Mina (DAM). Os dados foram implementados no software VADOSE/W e são referentes a três tipos de solo e um rejeito, somado aos dados climáticos diários (entre de janeiro de 2013 a dezembro de 2014) e análises paramétricas de uma mineração de ouro. Adotou-se o nível d'água como a condição inicial estabelecida para a comparação entre os quatro modelos propostos. Os resultados permitiram a caracterização geotécnica dos solos e do rejeito, a identificação de perfis de umidade, sucção, saturação e vazão nos solos utilizados nos sistemas de coberturas. Dentre os quatro modelos, dois foram escolhidos como sendo os melhores para implantação, sendo o I prescritivo e o II evaporativo. Já os modelos III e IV foram ineficientes na função de barrar a entrada de oxigênio e, por isso, foram descartados. Com os resultados, contribui-se então, para a construção de modelos de sistemas de coberturas coerentes com a realidade em mineração de Ouro.

Abstract – The objective of this work was the simulation of four numerical models (I, II, III, IV) of evapotranspiratives and prescriptive covers systems for decommissioning of dam reservoirs, in order to minimize the formation of Mine Acid Drainage (MAD). The data have been implemented in the software VADOSE/W and refer to three types of soil and a tailings, added to daily climatic data (between January 2013 to December 2014) and parametric analysis of a gold mining. The water level was adoted as the initial condition established for the comparison between the four proposed models. The results allowed the geotechnical characterization of soils and tailings, the identification of humidity profiles, suction, saturation and flow profiles in soils used in cover systems. Among the four models, two were chosen as being the best for implantation, with the (I) prescriptive and (II) evaporative. However models III and IV were inefficient in the function of barring the entrance of oxygen and, therefore, they were discarded. With the results, it contributes to the construction of models of coverage systems consistent with reality in gold mining.

Palavras-Chave – rejeito de mineração; impermeabilização; estabilidade

¹ Eng. Ambiental, MsC, Universidade Federal de Viçosa: Viçosa – MG, (31) 3899-2740, thaissimoes2004@yahoo.com.br

² Professor Titular, PhD, Universidade Federal de Viçosa: Viçosa – MG, (31) 3899-2740, emarques@ufv.br

³ Eng. Civil, Doutorando em Engenharia Civil/Geotecnia, Universidade Federal de Viçosa: Viçosa – MG, (31) 3899-2740, cleverson.lima@ufv.br

⁴ Eng. Ambiental, Doutorando em Engenharia Civil/Geotecnia, Universidade Federal de Viçosa: Viçosa – MG, (31) 3899-2740, laismily9@gmail.com

⁵ Professor Adjunto, DsC, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro: Três Rios-RJ, (24) 2681-4921, sadyenezes@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

A Produção Mineral Brasileira (PMB) ganhou um impulso a partir dos anos 2000, principalmente por causa do crescimento mundial, que resultou no aumento da demanda por recursos minerais. Em 2011, com uma produção de 66 toneladas, o Brasil foi considerado o décimo terceiro maior produtor de Ouro, segundo dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2012). Segundo IBRAM (2012), a empresa Kinross detém cerca de 29% da produção nacional de ouro, sendo uma das principais produtoras do Brasil. Sua unidade instalada desde 1987 no município de Paracatu-MG, era nomeada, à época, como Rio Paracatu Mineração (RPM).

Um dos principais problemas ambientais associados à mineração de ouro é a Drenagem Ácida de Mina (DAM), que resulta da oxidação do enxofre associado (no estado reduzido) quando exposto à ação do oxigênio e da água, na presença ou não de oxidantes. Tratando-se de um efluente com elevada acidez e com altas concentrações de metais como: As (Arsênio), Al (alumínio), Cu (cobre), Fe (ferro), Mg (magnésio), Mn (manganês) e Zn (zinco), além de ânions sulfato. Segundo Amorim (2008), caso esse efluente alcance corpos hídricos (superficiais ou subterrâneos), vão contaminá-los tornando-os impróprios para o uso em quaisquer atividade, mesmo depois de cessadas as atividades de mineração.

Por isso, é fundamental promover a disposição adequada dos resíduos nas operações da mina de ouro como forma de impedir que as superfícies de rejeitos e/ou estéreis, que contenha minerais sulfetados, fiquem expostas às condições oxidantes e a presença de água, prevenindo e minimizando a DAM.

Propõe-se então a utilização de um sistema de cobertura de solo capaz de reduzir a infiltração de água e a entrada de oxigênio nas mesmas, evitando a formação da DAM, e possibilitando o descomissionamento dos reservatórios das barragens. A DAM, após iniciada, pode continuar ao longo de décadas ou mesmo séculos, mesmo após a mineração ter encerrado suas atividades (INAP, 2014). As coberturas secas têm sido estudadas como alternativa de prevenção, visto que a remediação tem se mostrado de custo elevado. O custo de remediação da DAM em minas abandonadas na América do Norte foi estimado em dezenas de bilhões de dólares (INAP, 2014). No estudo em questão, pretende-se impedir ou diminuir a percolação da água dentro do sistema, de modo que ela não chegue ao rejeito gerador da DAM, utilizando uma abordagem hidromecânica do problema de engenharia, por isso justifica-se o uso das coberturas. Esse processo de descomissionamento será iniciado na Barragem Santo Antônio, apresentada na Figura 1.1, que já foi alteada até sua cota máxima e estar em processo de encerramento das atividades.



Figura 1.1: Barragem de rejeitos Santo Antônio (Kinross, 2014)

De acordo com INAP (2014), o caso mais simples, ou seja, a aplicação de uma cobertura convencional, deve ser avaliada primeiramente durante a fase de projeto conceitual de um sistema de coberturas, seguido do aumento da complexidade do sistema com a inclusão de novas camadas de solos e geotêxteis. Faz-se isso até que se cheguem aos objetivos desejados para o projeto. Em geral, este aumento da complexidade no projeto de um sistema de cobertura, implica em um maior desempenho deste, mas também em um aumento dos custos e nos desafios associados a implantação do sistema de coberturas. Conhecendo tais dificuldades, apresenta-se neste trabalho, a análise de modelos convencionais e evapotranspirativos, permitindo avaliar a viabilidade econômica de cada um, na prática, uma vez que a quantidade de material e a disponibilidade in-situ são fatores que influenciam o custo final de um projeto de sistemas de cobertura. Assim, a importância da simulação de modelos numéricos computacionais se justifica, pois possibilita a implantação de projetos mais eficientes no campo. Neste trabalho, aplica-se uma metodologia para dimensionamento de sistemas de cobertura de solos que utiliza modelos numéricos implementados no software VADOSE/W; seguindo a verificação da influência do nível d'água nos sistemas simulados; e verificar a entrada de oxigênio no sistema a partir do levantamento do grau de saturação nas camadas barreira hidráulica nos modelos simulados.

2. MATERIAIS, MÉTODOS E CARACTERIZAÇÃO

2.1. Tipos de Solo e Rejeito

Foi realizado experimentos com três solos retirados de uma área de empréstimo localizada à jusante da Barragem Santo Antônio:

- A amostra retirada entre 0 a 20 cm foi denominado Solo 1 e constituirá Camada de Solo Superficial (topsoil) na estrutura da cobertura.
- A amostra retirada entre 20 a 40 cm foi denominado Solo 3 e constituirá a Barreira Hidráulica (BH) na estrutura da cobertura.
- A amostra retirada entre 50 a 70 cm foi denominado Solo 2 e constituirá a Camada de Armazenamento e Liberação na estrutura da cobertura.

O rejeito foi amostrado na praia, próximo à ombreira direita da barragem, no lado contrário ao local em que se realiza a captação de água. Os três tipos de solos e o rejeito são apresentados na Figura 2.1, a seguir:



Figura 2.1: Solos e rejeito utilizados nos ensaios.

2.2. Ensaios

Ensaios para Determinação da Massa Específica e da Granulometria, passantes na peneira 4,8mm;

- Determinação dos Limites de Atterberg (LL e LP);

- Ensaios de Compactação (Proctor Normal);
- Ensaios de Permeabilidade;
- Ensaios de Sucção (Método do Papel Filtro);
- Método da Centrífuga, para obter as propriedades hidráulicas do solo seguindo o proposto por Guimarães (2013).

2.3. Análise Numérica

A análise numérica dos sistemas de cobertura foi realizada aplicando o modelo unidimensional implementado no programa VADOSE/W do pacote GeoStudio. A seguir são apresentados os modelos numéricos construídos no VADOSE/W, bem como os parâmetros de entrada e as condições de contorno utilizadas.

Nos modelos I e III, admitiu-se o nível d'água no topo da camada de rejeito equivalente a 1m, representando a pior situação possível para a simulação, pois tende a reduzir o efeito de sucção nas diferentes camadas. Ao longo tempo, espera-se que caso a água infiltrada não chegue na camada de rejeito e o nível d'água rebaixe, indicará que a cobertura é eficiente na remoção da água infiltrada e que o efeito da sucção aumentou.

Para os modelos II e IV, o nível d'água foi posicionado na cota -1 m, afim de comparar a influência do nível d'água na eficiência dos modelos apresentados nesse estudo. Para os parâmetros vegetais, como o Índice de Área Foliar (IAF), a profundidade da raiz e ponto de murcha, foram utilizados os valores sugeridos por Ribeiro (2011). Adotou-se tais parâmetros devido à impossibilidade de realizar tais medições, por falta de instrumentação específica instalada no campo.

Já os parâmetros térmicos, Condutividade Térmica (kJ/(dia m °C)) - 250-285 e Calor Específico Volumétrico (kJ/(m³ °C)) - 2250-2900, foram adotados os sugeridos pelo software VADOSE/W, mantendo-os inalterados em todos os modelos gerados. Para os modelos unidimensionais, foram inseridos os seguintes dados climáticos diários, mostrados nas Figuras 2.2 a 2.5:

- precipitação
- temperaturas máxima e mínima
- umidade média relativa do ar
- velocidade do vento, que são imposições ao modelo como condição de contorno no topo da cobertura.

A radiação solar utilizada foi a sugerida pelo software, que forneceu um melhor ajuste do que a radiação divulgada no boletim do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2015), seguindo o mesmo procedimento adotado por Ribeiro (2011). Os dados foram consultados no boletim público do INMET, fornecidos pela estação 83479, instaladas no município de Paracatu, no período entre 01/2013 a 12/2014, sendo o período mínimo para se fazer uma análise confiável.

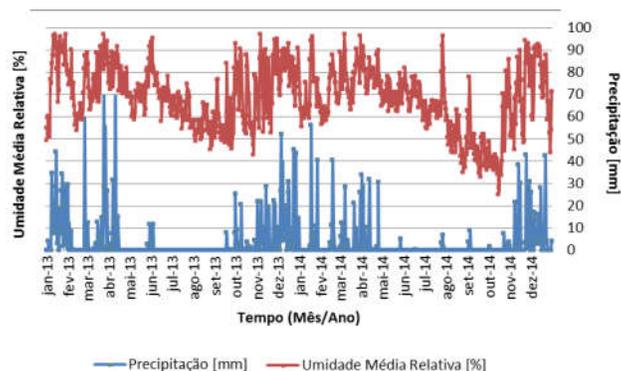


Figura 2.2: Precipitação e Umidade Média Relativa – Intervalo entre Janeiro/2013 e Dezembro/2014(INMET).

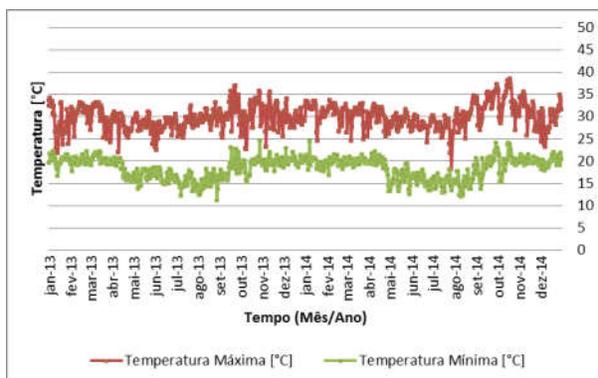


Figura 2.3: Temperatura Máxima e Mínima entre Janeiro/2013 e Dezembro/2014 (INMET).

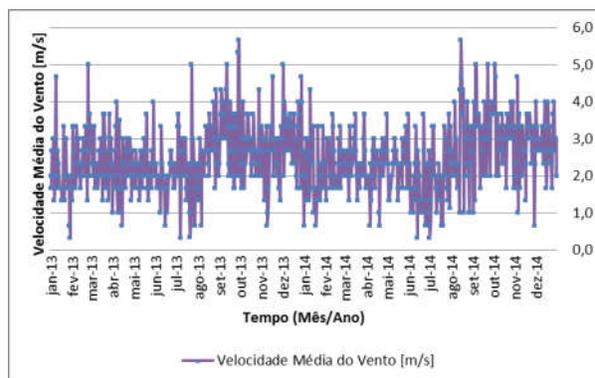


Figura 2.4: Velocidade do Vento entre Janeiro/2013 e Dezembro/2014 (INMET).

2.4. Parâmetros de Entrada VADOSE:

Condição inicial:

- a) Modelos I e III - Posição do nível d'água coincide com a altura do rejeito, na cota 1,0 m.
- b) Modelos II e IV - Posição do nível d'água está na cota -1,0 m da camada de rejeito considerada.
- c) Vegetais - IAF, Profundidade da raiz (cm), Sucção referente ao ponto de murcha permanente (kPa)
- d) Térmicos - Condutividade térmica $\text{kJ}/(\text{dia m } ^\circ\text{C})$ - 250-285, Calor específico volumétrico $\text{kJ}/(\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C})$ - 2250-2900 (Ribeiro, 2011 e Banco de Dados VADOSE/W).
- e) Geotécnicos - Curva Granulométrica e Condutividade Hidráulica.
- f) Climáticos - Precipitação (mm), Temperatura ($^\circ\text{C}$), Umidade Relativa do Ar (%), Velocidade do Vento (m/s).

Apresenta-se no Figura 2.5, ao lado, os modelos numéricos que serão considerados neste trabalho. As análises propostas foram realizadas aos pares (I e III; II e IV), o que permitiu verificar a influência da variação do nível d'água no comportamento de cada modelo. Com objetivo de se observar a diferença no comportamento entre os diversos modelos, considerando a umidade volumétrica e à sucção, foi incluída a vazão na base da camada de rejeito. Isso possibilitou a obtenção de um modelo aproximado à situação de campo.

Foram realizadas simulações nos seguintes pontos:

- Topsoil: Pontos escolhidos na superfície de forma a determinar a maior influência das condições de contorno, principalmente, as climáticas;
- Camada de Armazenamento e liberação, barreira hidráulica, rejeito: Pontos escolhidos no meio das camadas de forma a minimizar a interferência das camadas adjacentes nos resultados da simulação.
- Foram escolhidos três pontos correspondentes ao período úmido, período seco e outro úmido, todos no ano de 2014. Foram correlacionadas nas simulações umidade volumétrica, a poro-pressão e a profundidade.

Análise	Configuração Modelo	Profundidade e Camadas
Cobertura Evapotranspirativa com Nível D'Água 1m (Equivalente à Altura da Camada de Rejeito) Modelo I		0,15 m Camada Top Soil 0,50 m Camada de Armazenamento e Liberação (CAL) 0,50 m para a Camada de Barreira Hidráulica (BH) 1,0 m para a Camada de Rejeito 1,0 m de Largura
Cobertura Evapotranspirativa com Nível D'Água -1m Modelo II		0,15 m Camada Top Soil 0,50 m Camada de Armazenamento e Liberação (CAL) 0,45 m para a Camada de Barreira Hidráulica (BH) 1,0 m para a Camada de Rejeito 1,0 m de Largura
Cobertura Prescritiva com Nível D'Água 1m (Equivalente à altura da camada de rejeito) Modelo III		0,20 m Camada Top Soil 0,40 m para a Camada de Barreira Hidráulica (BH) 1,0 m para a Camada de Rejeito 1,0 m de Largura
Cobertura Prescritiva com Nível D'Água -1m Modelo IV		0,20 m Camada Top Soil 0,40 m para a Camada de Barreira Hidráulica (BH) 1,0 m para a Camada de Rejeito 1,0 m de Largura

Figura 2.5 - Modelos Numéricos

3. RESULTADOS

3.1. Simulação de Umidade Volumétrica, Sucção e Vazão entre os Modelos I a IV

Segundo EPA (2002), o componente mais acima de um sistema de cobertura é a camada superficial (topsoil), e suas entre suas funções, destacam-se a resistência à erosão pela água e pelo vento, uso como base para o crescimento da vegetação e a promoção da evapotranspiração. Tal camada é a mais influenciada pelos fatores climáticos, ficando claro, como a variação de umidade volumétrica é semelhante ao regime de chuvas no mesmo período, como é mostrado nas Figuras 3.1 e 3.2.

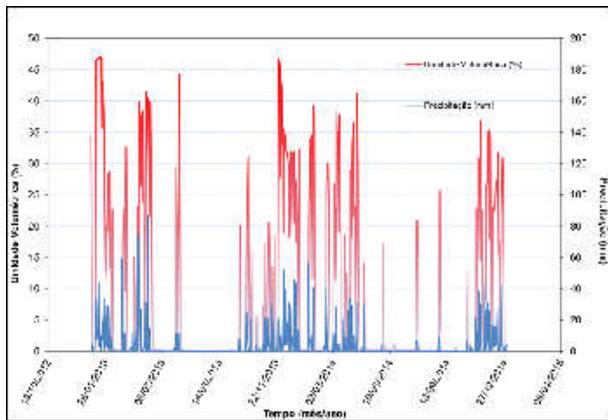


Figura 3.1: Relação Umidade Volumétrica x Tempo (Topsoil) - Modelo I e II.

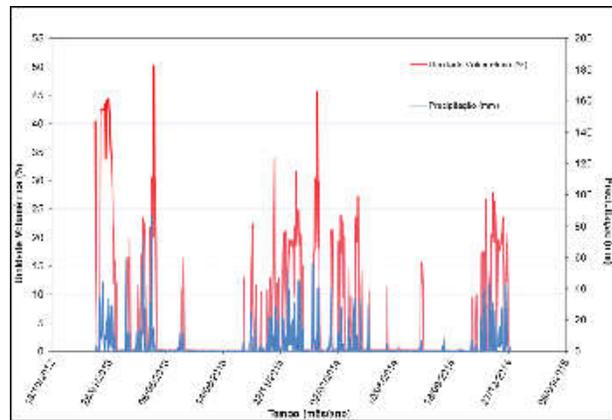


Figura 3.2: Relação Umidade Volumétrica x Tempo (Topsoil) - Modelo III e IV.

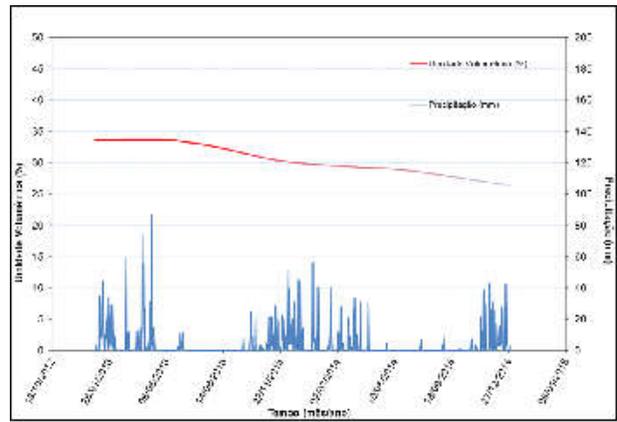
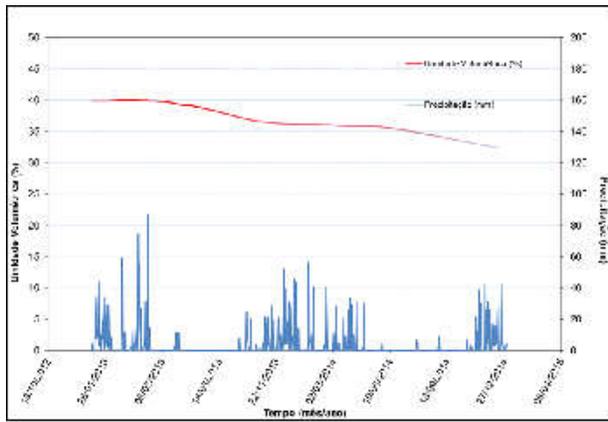


Figura 3.3: Relação Umidade Volumétrica x Tempo (Camada de Armazenamento e Liberação) - Modelo I e II.

Figura 3.4: Relação Umidade Volumétrica x Tempo (Camada de Armazenamento e Liberação) - Modelo III e IV.

O Solo 2 da camada de armazenamento e liberação, entre 50cm a 70cm, deve continuar úmida em todos os períodos, inclusive nos mais secos. Pode-se observar que tanto no Modelo I quanto no Modelo III, a perda de umidade em todo o período fica em torno de 9%. Ou seja, nas duas simulações a camada está desempenhando a função desejada. A diferença constatada entre os valores máximos e mínimos da umidade foi devido a variação do nível d'água, ficando evidente nas Figuras 3.3 e 3.4.

EPA (2002), menciona que a camada de Solo 3, entre 20cm a 40cm, constituindo a Barreira Hidráulica, funciona como um obstáculo físico de baixa permeabilidade cuja função é impedir a migração da água infiltrada para o rejeito. Nota-se no modelo I e III, uma diferença suave na umidade decorrente da drenagem natural, não significando a princípio, nenhum problema estrutural. Comportamento similar foi encontrado na comparação entre os modelos II e IV. Os valores iniciais e finais da umidade mostradas nas duas simulações, possuem diferenças que estão relacionadas à variação do nível d'água. A Figuras 3.5 ilustra a variação não significativa da umidade, mostrando a eficiência dessa camada nos modelos simulados.

As camadas de rejeito nos modelos I e III, apresentaram umidades volumétricas diversas, claramente em virtude da variação do nível d'água. Sendo observada um comportamento análogo nos modelos II e IV. No Modelo I e II, o rejeito encontrava-se saturado ou próximo da saturação, sendo o inverso no Modelo III e IV. Esses fatos são observados na Figura 3.6.

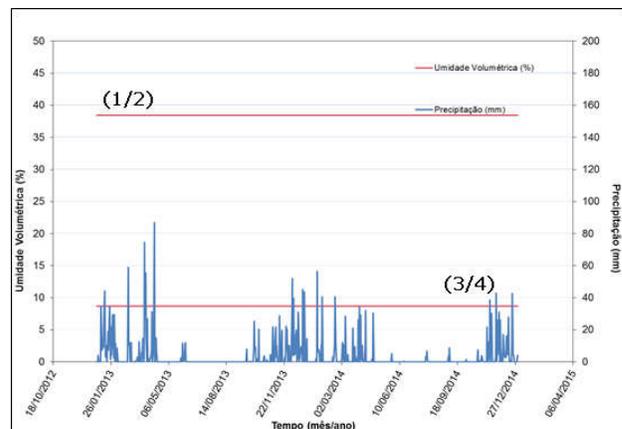
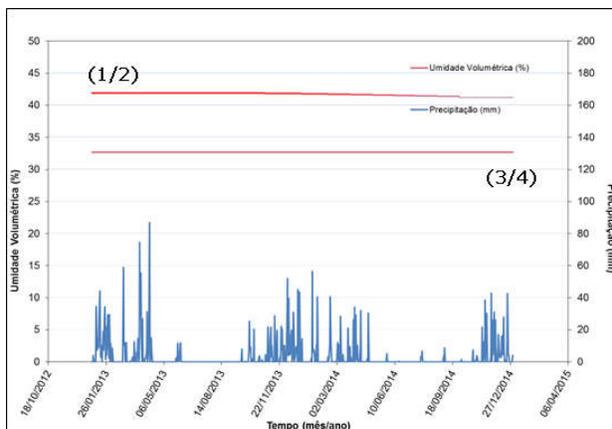


Figura 3.5: Relação Umidade Volumétrica x Tempo (Barreira Hidráulica) - Modelo I / II com III / IV

Figura 3.6: Relação Umidade Volumétrica x Tempo (Rejeito) - Modelo I / II com III / IV

As Figuras 3.7 e 3.8, mostram que a sucção é inversamente proporcional à umidade, ficando evidente os maiores valores de sucção na camada topsoil nos modelos I e III tanto no Modelo I, ocorrem no mês de menor precipitação no intervalo considerado, em 06/2014. Tal comportamento foi observado na comparação entre os modelos II e IV.

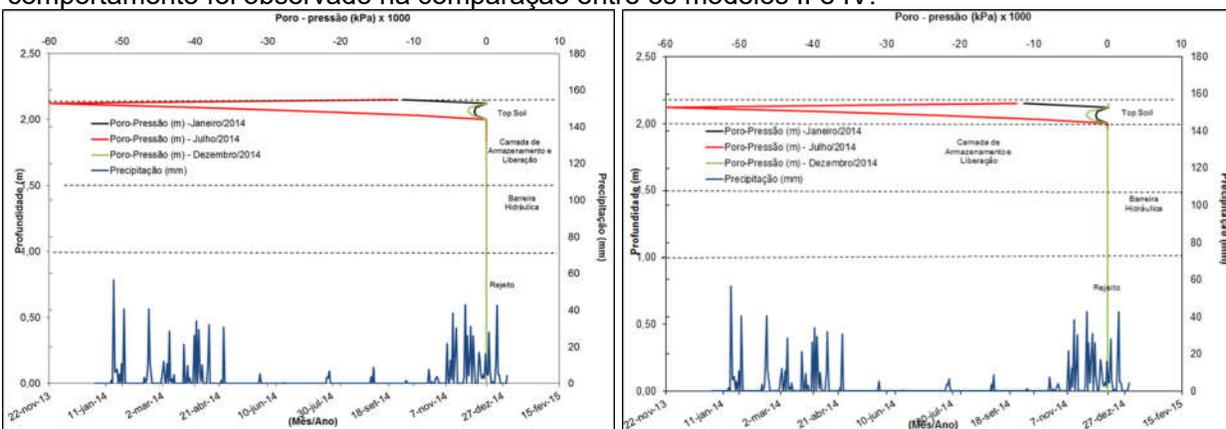


Figura 3.7: Relação Poro-Pressão x Profundidade no ano de 2014-Modelo I e II

Figura 3.8: Relação Poro-Pressão x Profundidade no ano de 2014-Modelo III e IV.

A soma de toda a vazão para o intervalo considerado de 730 dias, entre 2013 e 2014, foi pequena, ficando em $1,59 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{dia}$ para o modelo I e $1,38 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{dia}$ para o modelo III. Já para o modelo II ficou em $3,03 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{dia}$ enquanto o modelo IV ficou em $5,22 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{dia}$.

Os valores obtidos nos modelos I e II, proporcionalmente, são maiores que os obtidos nos modelos III e IV, podendo ser explicado pela perda natural da água para as camadas, considerando a drenagem do próprio rejeito. No modelo I e II, a camada de rejeito está saturada ou perto da saturação, possuindo mais água para drenar do que a mesma camada do modelo III e IV, cujo nível d'água encontra-se abaixo dela.

Conclui-se com isso, que quanto menos água existir no sistema, mais difícil será a sua retirada, desta forma, explica-se a vazão obtida no modelo III e IV ser menor que o modelo I e II. Todavia, como ambos sistemas estão drenando, logo estão aumentando sua estabilidade e melhorando a performance na proteção do rejeito, ao longo do tempo, conforme o esperado.

3.2. Saturação nas Camadas de Barreira Hidráulica nos Modelos I a IV

Os Modelos I e II apresentam as camadas barreira hidráulica com saturação acima dos 90%, sendo, portanto, eficientes na função de impedir a passagem de oxigênio, já que o valor de saturação mínimo para impedir é de 80%. Já os Modelos III e IV não foram eficientes para impedir a passagem de oxigênio, pois apresentaram grau de saturação em torno de 75% - Figuras 3.24 e 3.26. A mesma ineficiência foi constatada para os períodos de seca, ou seja, abaixo de 80%, o que permitia a passagem de oxigênio.

Nas figuras abaixo, compara-se os modelos I com III e o II com IV. Verifica-se o comportamento similar para a saturação na camada de barreira hidráulica entre os modelos I com II e II com IV.

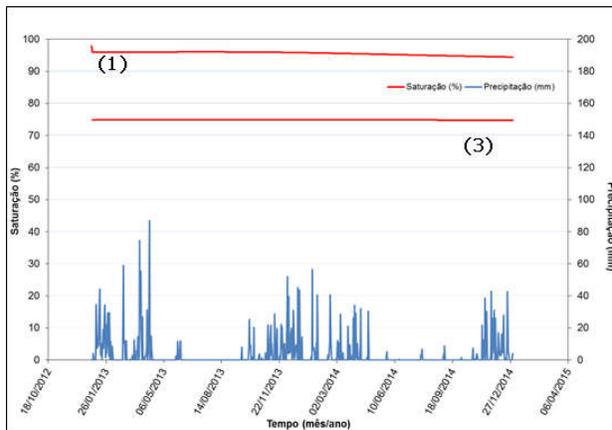


Figura 3.9: Relação Saturação na Camada Barreira Hidráulica x Tempo - Modelo I x Modelo III.

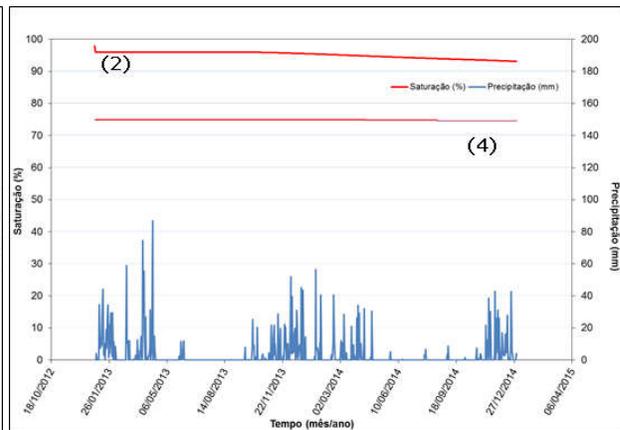


Figura 3.10: Relação Saturação na Camada Barreira Hidráulica x Tempo - Modelo II x Modelo IV.

4. CONCLUSÕES

A alteração do nível d'água influenciou na saturação da camada barreira hidráulica. Os Modelos III e IV foram considerados ineficientes na função de barrar a entrada de oxigênio junto com a água, permitindo a DAM, sendo descartados como alternativas a implantação em campo.

Já os resultados obtidos nos modelos I e II são eficientes e passíveis de implantação como sistemas de cobertura no descomissionamento de barragem de rejeito, a despeito deles serem evapotranspirativo e prescritivo, respectivamente. Considerando os aspectos econômicos, o modelo II é o de melhor custo x benefício, pois necessita de menor quantidade de material, menos camadas e tempo reduzido frente ao modelo I. Entretanto, apesar das desvantagens listadas, pode-se considerar o modelo I para solucionar a questão da engenharia, pois este possui a vantagem de simular uma estrutura natural de solo, conferindo maior durabilidade e menor manutenção no longo prazo.

5. REFERÊNCIAS

- Abreu, A.T., Faria, E.M., Guimarães, J.A.C., Leite, A. L., Lena, J.C. de. (2012) Avaliação em laboratório do uso de sistemas de coberturas alcalinas para prevenção da drenagem ácida de mina. Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso), v. 36, p. 787-802.
- 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.
- EPA (2002). "Technical Guidance For RCRA/CERCLA Final Covers". Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington DC.
- GARD/INAP. Global Acid Rock Drainage Guide. The International Network for Acid Prevention. Disponível em: <http://www.gardguide.com>. Acesso em 8 de maio de 2015.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2002). VADOSE/W User's Manual, Version 1.01, Calgary, Alberta, Canada.
- GUIMARÃES, L. M. (2013). Determinação das propriedades hidráulicas em solos não saturados utilizando uma centrifuga de pequenas dimensões. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 133 p.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (2012). Informações e análises da economia mineral brasileira 7ª Edição. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>. Acesso em 8 de maio de 2015.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (2015). Dados climáticos de Paracatu. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em 8 de maio de 2015.

KINROSS GOLD CORPORATION. Disponível em http://www.kinross.com.br/paracatu.php?id_category=3. Acesso em 8 de maio de 2015.

Ribeiro, A.G.C. et al. (2011). Metodologia para dimensionamento de sistemas de cobertura com base em estudo de caso realizado na mina da empresa Rio Paracatu Mineração (RPM) em Paracatu, Minas Gerais. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 182 p.