

Análises numéricas para avaliação de cobertura seca com função de reduzir a drenagem ácida de rocha

Rodrigo Pereira de Almeida
UFOP, Belo Horizonte, Brasil, rodrigo26@gmail.com

Adilson do Lago Leite
UFOP, Ouro Preto, Brasil, alleite@em.ufop.br

Anderson Borghetti Soares
UFC, Fortaleza, Brazil, borghetti2@yahoo.com.br

RESUMO: Lisímetros contendo material sulfetado e coberturas secas foram modelados numericamente com objetivo de avaliar os fluxos em meio não saturado principalmente de oxigênio. Ensaio geotécnicos foram realizados para caracterização dos materiais como granulometria, limites de Atterberg, peso específico dos sólidos e condutividade hidráulica saturada. Os lisímetros foram construídos de forma a simular uma cobertura inclinada. Os materiais empregados foram resíduos do próprio local da mina neutralizados pela adição de escória de aciaria. Os fluxos na base, nas camadas e escoamento lateral foram monitorados por um período de 160 dias e os volumes obtidos. O programa computacional utilizado foi o Vadose/W. Verificou-se que a cobertura proposta possui boas propriedades para bloqueio ao fluxo de oxigênio. Foi possível prever a dimensão ideal de cobertura que seria com 130cm de espessura.

PALAVRAS-CHAVE: Cobertura seca, escória de aciaria, material sulfetado, drenagem ácida, fluxo de oxigênio.

1 INTRODUÇÃO

As condutividades hidráulicas dos materiais em meio não saturado como de coberturas secas podem ser estimadas por métodos como Van Genuchten (1990) ou Freudlund e Xing (1994). A curva do teor de umidade volumétrico pela sucção do solo e a condutividade hidráulica saturada são dados de entrada desses métodos.

Além dos materiais, os fluxos em meio não saturado dependem do clima, já que ocorre uma interação contínua devido à precipitação, radiação solar, velocidade do vento, umidade do ar e temperatura. A precipitação menos o escoamento superficial corresponde ao que infiltrou no sistema. Dessa maneira, o fluxo pode ocorrer entre camadas, permanecer armazenado, percolar para o material sulfetado e evaporar.

A evaporação pode ser determinada por métodos como Wilson (1990) que modificou o cálculo de evaporação desenvolvido por Penman

(1948) e aplicou em coberturas secas. Outra forma de mensurá-la é pelo balanço hídrico em lisímetros.

O transporte de oxigênio também é calculado por meio das teorias de Collin e Ramuson (1988) que são equações empregadas pelo programa Vadose/W. O fluxo de oxigênio pode ocorrer na fase ar e na fase água. Sabe-se que a solubilidade do oxigênio em água é muito menor que no ar, em torno de 25000 vezes. Dessa forma, a fase ar é predominante para determinar a quantidade de oxigênio que ingressa no material sulfetado.

As coberturas secas tradicionais podem ser barreiras que impedem o fluxo de água como também barreiras ao ingresso de oxigênio. O tipo de cobertura proposta deve estar de acordo com o clima do local e com os materiais disponíveis. Em locais com grandes volumes precipitados anualmente, coberturas impermeáveis são inviáveis. Períodos muito secos também inviabilizam barreiras ao ingresso de oxigênio.

O bloqueio ao ingresso de oxigênio está ligado ao alto grau de saturação das coberturas. Coberturas que mantêm 85% de graus de saturação ou mais são boas para bloquear o ingresso do oxigênio conforme estudos de Yanful (1993).

O clima de Ouro Preto é muito úmido com precipitações em média de 1700 mm/ano/m². No entanto, o clima possui um período de estiagem. Dessa maneira, buscou-se uma cobertura que permitisse a percolação de água nos períodos de chuva e mantivesse um alto grau de saturação durante o período de estiagem. A água percolada foi tratada por meio da escória de aciaria e a geração da drenagem ácida foi reduzida, já que a cobertura possui objetivos de bloqueio ao ingresso de oxigênio.

2 METODOLOGIA

A modelagem numérica foi realizada com base em dois lisímetros. Os lixiviados dos lisímetros foram coletados e seus volumes determinados. Sensores de oxigênio mediram as concentrações durante todo o experimento que durou 120 dias. As condições de contorno foram definidas com uma lateral impermeável e fundo com drenagens devido à construção de colchões drenantes.

Os colchões são constituídos por geotêxtil com função de filtro e material granular como britas para escoamento interno. Por fim, a condição de contorno climática foi obtida com dados climáticos do INMET.

O software empregado foi o Vadose/W que utiliza o método de elementos finitos para os cálculos de fluxos. O balanço hídrico permitiu definir a evaporação. As concentrações de oxigênio permitiram a calibração do sistema de forma mais precisa. Com o sistema calibrado, pôde-se extrapolar as análises e obter as espessuras adequadas das camadas de cobertura para suportar o clima anual de Ouro Preto.

Os sensores de oxigênio da marca ICT modelo ICT02 obtiveram as concentrações de oxigênio diariamente.

A Figura 1 apresenta a modelagem numérica do experimento nos dois lisímetros. O método utilizado foi “Transient Coupled”, que permitiu estudar por um período de 160 dias o fluxo em meio não-saturado sob a influência do clima de Ouro Preto. O período estudado foi escolhido por ser a estação chuvosa, assim, pôde-se coletar lixiviado e avaliar a qualidade da água com o experimento exposto à atmosfera.

O número máximo de iterações foi de 20, com uma tolerância de 0,1. O tamanho do elemento padrão da malha de elementos finitos foi de 0,1 metros. No Lisímetro L01, a quantidade foi 58 elementos e 78 nós foram gerados pela malha. No outro lisímetro (L02), 154 elementos e 178 nós foram obtidos.

As propriedades geotécnicas dos materiais, as quais também são também dados de entrada do Vadose/w (Geo-slope, 2007) estão apresentados na Tabela 1.

Os materiais empregados na modelagem, são ES2 em verde, AM2 em amarelo e M33 em vermelho. O material sulfetado AM2 (amarelo) é a amostra proveniente da Mina de Pirita. No Lisímetro L01 (“em branco”), apenas a amostra AM2 foi lançada, de forma a avaliar a geração da DAR sem nenhum controle de mitigação. Já no outro lisímetro (L02), um sistema de cobertura contendo duas camadas foi aplicado acima da amostra AM2.

Em verde, a camada composta de ES2 possui 10 cm de espessura e se comporta como uma camada granular de coberturas capilares (O’Kane et al, 2002). As funções dessa camada podem ser de estabilização superficial do talude e proteção contra erosão. As propriedades que favorecem essa aplicação são a granulometria, que é classificada como pedregulho, e a alta densidade (Motz e Geiseler, 2001). Outra função dessa camada é evitar uma evaporação excessiva da camada M33 durante os períodos secos, mantendo o grau de saturação elevado para bloquear o ingresso de oxigênio.

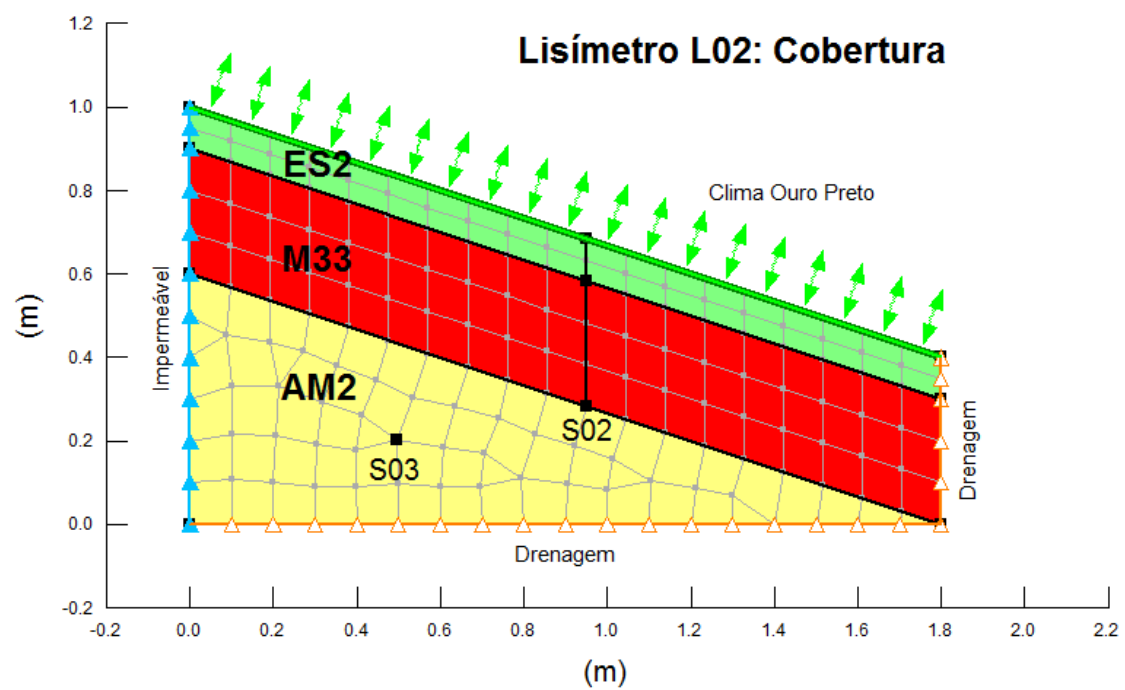
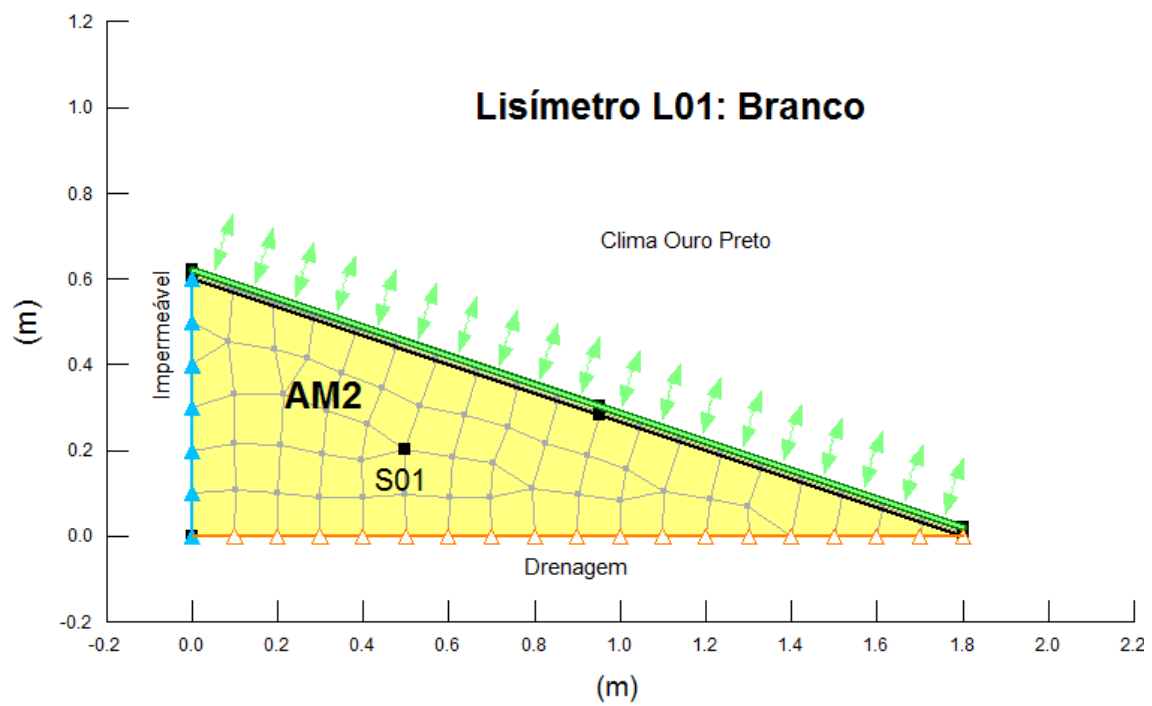


Figura 1: Modelagem numérica dos lisímetros com suas respectivas condições de contorno e sensores de oxigênio.

Tabela 1: Resumo da caracterização geotécnica e as normas utilizadas.

Material	ES2	AM2	M33	Norma
Granulometria				NBR 7181 (ABNT, 1984)
Argila ($\phi < 0,002$ mm)	0%	11%	8%	
Silte ($0,002 < \phi < 0,075$ mm)	0%	10%	10%	
Areia fina ($0,075 < \phi < 0,42$ mm)	6%	11%	12%	
Areia média ($0,42 < \phi < 2,0$ mm)	14%	28%	18%	
Areia grossa ($2,0 < \phi < 4,75$ mm)	22%	21%	19%	
Pedregulho ($4,75 < \phi < 60,0$ mm)	58%	19%	33%	
D_{60} (mm)	8,00	2,00	5,00	
D_{30} (mm)	3,00	0,20	0,08	
D_{10} (mm)	0,60	0,001	0,005	
Cu	13,33	2000,0	1000,00	
Cc	1,88	20,00	22,50	
LL	n/p	39,3%	38,7%	NBR 6459 (ABNT, 1984)
LP	n/p	27,6%	25,3%	NBR 7180 (ABNT, 1984)
IP	n/p	11,7%	13,4%	
Classificação - SUCS	GW	SC	SC	
ρ_s (g/cm ³)	3,802	2,915	3,550	
Condutividade Hidráulica Saturada				NBR 13292 (ABNT, 1995)
K_{sat} (cm/s)	$9,32 \times 10^{-02}$	$1,01 \times 10^{-03}$	$6,80 \times 10^{-04}$	
K_{sat} (m/dia)	80,53	0,87	0,59	
Peso (kgf)	532,86	1.440,34	1.147,50	
Volume (m ³)	0,29	1,08	0,68	
Peso Específico γ (kN/m ³)	18,34	13,08	16,68	
Teor de Umidade Gravimétrico w	8%	27%	21%	
Peso Específico Seco γ_d (kN/m ³)	16,98	10,30	13,78	
Peso Específico Seco γ_d (gf/cm ³)	1,73	1,05	1,40	
Massa específica dos sólidos ρ_s (g/cm ³)	3,80	2,91	3,57	NBR 6508 (ABNT, 1984)
Índice de Vazios e	1,20	1,76	1,54	
Porosidade Total n	0,55	0,64	0,61	
Grau de Saturação S_r (inicial)	0,25	0,44	0,49	
Teor de Umidade Volumétrica Θ (inicial)	14%	28%	30%	

A camada principal do sistema de cobertura é composta pelo material M33 em vermelho. Essa camada possui 30 cm e é constituída por uma mistura de amostra ES2 com AM2 na proporção de 33% (peso seco). A finalidade principal dessa camada é reduzir a percolação de água e o ingresso de oxigênio para o material protegido.

Yanful (1993) menciona que o dimensionamento dos sistemas de cobertura para a diminuição da geração ácida deve considerar a redução no fluxo de oxigênio em direção ao material sulfetado. Assim, o teor de umidade e o grau de saturação devem se manter elevados. Segundo, ensaios de laboratório realizados por Yanful (1993), os valores de referência são de 85% para o grau de saturação.

Para altos valores do grau de saturação, os vazios preenchidos com ar nos poros do solo estão desconectados devido à presença de água. Dessa maneira, os caminhos pelos quais o oxigênio poderia ingressar são bloqueados pela água presente nos poros.

Ainda pode-se supor que o ingresso poderia ocorrer na fase líquida. No entanto, o transporte de oxigênio na fase água do solo é extremamente lento devido a solubilidade de oxigênio em água ser 25000 vezes menor que em ar.

Se a cobertura estiver totalmente saturada, ocorre o inconveniente de aumentar o fluxo de água para o material protegido, o que não é desejável. Ao contrário, se o grau de saturação estiver baixo, ou seja, material seco, o ar nos poros pode se conectar e criar caminhos preferenciais para o ingresso de oxigênio.

O ideal seria se a camada M33 mantivesse o grau de saturação acima de 85% por todo ano hidrológico. Pode-se acrescentar que a alta saturação se torna benéfica para um sistema de cobertura reativa com agentes alcalinos. A presença constante de água estimularia a maior dissolução e lixiviação dos álcalis, com maior a capacidade de neutralização.

O contorno superior nas simulações foi composto pelos dados climáticos diários, como precipitação, umidade máxima e mínima, velocidade do vento, temperatura máxima e mínima e evaporação. O clima foi simbolizado na Figura 1 pelas setas duplas em verde claro. Os dados correspondem ao período em que o

experimento foi realizado que compreende dezembro de 2014 a março de 2015.

Outra condição de contorno está esquematizada por triângulos azuis na lateral esquerda da Figura 1, que representa o fechamento lateral impermeável do lisímetro, ou seja, vazão nula ($Q = 0 \text{ m}^3/\text{dia}$).

Finalmente, os triângulos com contorno laranja correspondem ao dreno que foi construído na parte inferior dos lisímetros. No Lisímetro L02, a condição de contorno também se estende na lateral direita da figura devido à criação das camadas na posição vertical.

A drenagem também é definida como $Q = 0 \text{ m}^3$ por dia, porém a opção de ajuste do nível da água do programa foi ativada (*"Potential Seepage Face Review"*). Assim, após cada interação realizada, a água acumulada na base é retirada do sistema.

A calibração do modelo numérico foi realizada por meio dos dados dos sensores de oxigênio e dos volumes acumulados nos reservatórios. Isso possibilitou o ajuste tanto do balanço hídrico como do transporte de oxigênio.

Os ajustes foram obtidos por procedimentos semelhantes aos utilizados por Song e Yanful (2011). Assim, os parâmetros de condutividade hidráulica não saturada, evaporação e coeficiente de decaimento da concentração de oxigênio puderam ser definidos.

4 RESULTADOS

4.1 Ensaios geotécnicos

Conforme o SUCS - Sistema Unificado de Classificação dos Solos (Das, 2007), a amostra ES2 é classificada como GW (pedregulho bem graduado). Ver Tabela 1.

Quanto aos limites de Atterberg da amostra ES2, o material foi classificado como não plástico devido à inexistência de finos. A massa específica dos sólidos (ρ_s) foi de $3,802 \text{ g/cm}^3$.

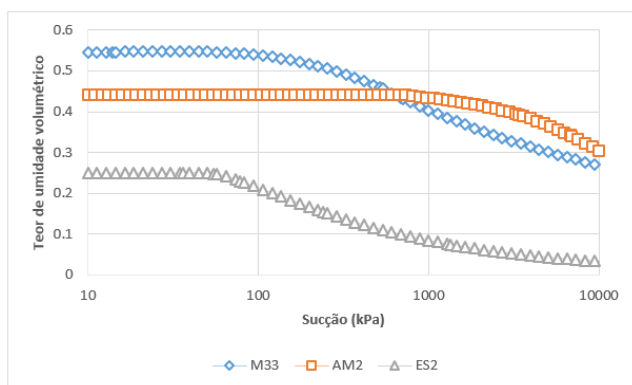
A amostra AM2 pode ser classificada como areia argilosa (SC). Seu limite de liquidez foi 39,3% e o de plasticidade 27,6%. Finalmente, o IP (Índice de Plasticidade) foi 11,7%. Esses valores demonstram que o material é bem plástico e contém argila, que representa 11% do material. A massa específica dos sólidos da AM2 foi $2,915 \text{ g/cm}^3$.

A classificação da mistura M33 é areia argilosa (SC), conforme o SUCS (Das, 2007). Os limites de liquidez e plasticidade e o IP foram respectivamente: 38,7%; 25,3% e 13,4%, semelhantes aos da amostra AM2, como esperado. A massa específica dos sólidos foi 3,55 g/cm³.

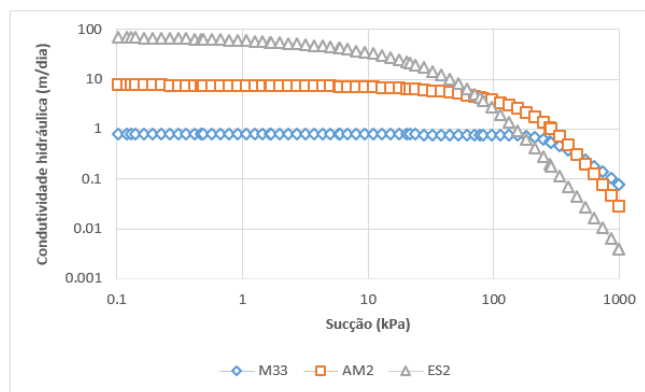
As curvas características solo-água, que expressam a sucção em função do teor de umidade volumétrico, foram obtidas por meio de correlações utilizadas pelo programa computacional. Os dados de entrada foram a classificação granulométrica do material e o teor de umidade volumétrico na condição saturada.

Os dados de sucção do solo em função do teor de umidade volumétrico estão em escala semi-logarítmica, conforme mostra a Figura 2.a. Percebe-se uma diferença significativa de sucção entre o material AM2 e ES2, relacionada às diferenças granulométricas destes dois materiais. Como esperado, ao se analisar a curva solo-água da amostra M33, verifica-se um comportamento intermediário em relação às curvas das amostras AM2 e ES2.

A condutividade hidráulica em meio não saturado (K_{ns}), dependente da sucção mátrica, foi obtida pelo método de Van Genuchten, adotado pelo programa Vadose/w. Os diagramas K_{ns} versus sucção matricial para as amostras ES2, AM2 e M33 podem ser observados na Figura 2.b.



(a)



(b)

Figura 2: Curvas características das amostras ES2, AM2 e M33. a) Curva característica solo-água; b) Condutividade hidráulica não saturada em função da sucção mátrica.

4.2 Análise numérica

A Figura 3.a mostra os valores de concentração de oxigênio do sensor S01 comparados aos resultados das análises numéricas para o lisímetro L01. A evaporação foi obtida pelo método de Penman-Wilson (PW) e, na sequência, foi alterada de forma a obter a curva que melhor se ajusta. O tempo de decaimento da concentração de oxigênio foi estimada pelo método de Mbonimpa et al. (2002).

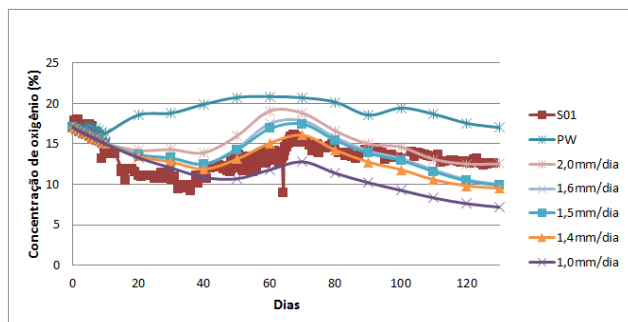
A curva com o tempo de decaimento de 0,15 anos e 1,4 mm/m² de evaporação diária representa a melhor aproximação em relação aos dados do sensor S01.

No entanto, as curvas não se sobrepõem. Inicialmente, os valores de concentração de oxigênio do S01 são maiores e, aos 130 dias, são menores. Esse efeito pode ser explicado pela variação do tempo de decaimento do oxigênio.

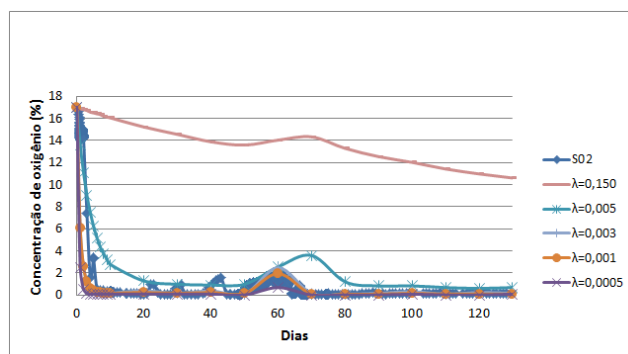
Até os 60 dias de monitoramento, as reações foram aceleradas. Após, 60 dias, as reações desaceleram. O consumo de oxigênio acompanha as reações, o que não ocorre de forma constante como considerado na modelagem.

Transferiu-se os mesmos parâmetros para a modelagem do L02. Percebe-se pela Figura 3.b, que para o tempo de decaimento igual a 0,15 anos, a curva da modelagem está muito distante dos dados obtidos pelo sensor S02. Uma

explicação para a concentração de oxigênio permanecer bem acima da medida são as altas taxas de ingresso de oxigênio pela cobertura.



(a)



(b)

Figura 3: Calibração dos sensores. a) Calibração da evaporação pelo sensor S01; b) Calibração do tempo de decaimento pelo sensor S02.

Na tentativa de verificar isso, tentou-se ajustar a curva por meio da alteração da condutividade hidráulica da cobertura. De forma a obter uma cobertura impermeável, procurou-se bloquear o ingresso de oxigênio e, assim, obter baixas concentrações deste gás, como mostradas pelo sensor S02. No entanto, a sensibilidade à alteração da condutividade hidráulica da cobertura foi muito pequena.

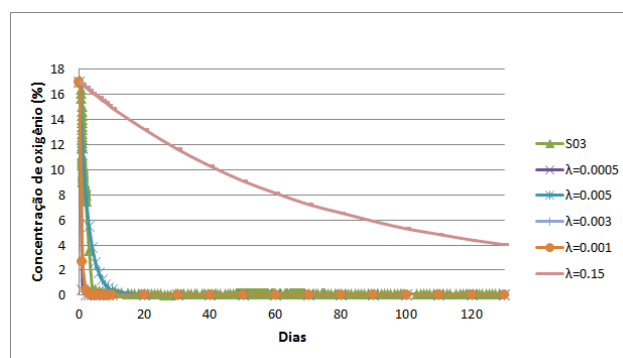
Conforme análises de Pereira de Almeida et al. (2015), esse tipo sistema de cobertura aumenta de forma significativa a capacidade de bloqueio ao ingresso de oxigênio com espessuras superiores a 1 m. Pode-se acrescentar que coberturas com espessura entre 1 e 4 metros podem ser empregadas como barreiras ao fluxo de oxigênio segundo O’Kane et al. (2002).

Os valores que melhor se ajustam são baixos entre 0,003 e 0,001 anos. Pode-se compreender que existe um alto consumo de oxigênio no

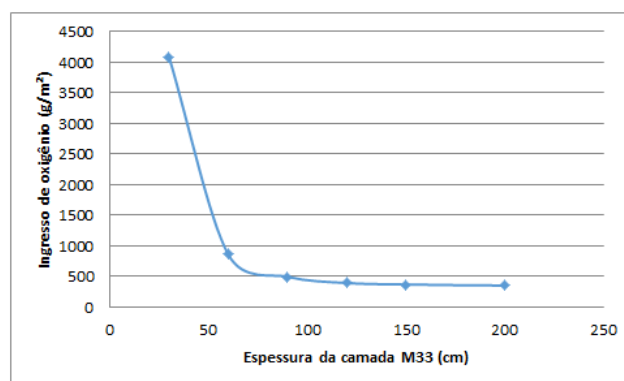
lisímetro L02 e isso implica que as reações de geração de DAR neste lisímetro estão ocorrendo a velocidades bem mais altas que no L01.

Na modelagem do fluxo de oxigênio realizada por Song e Yanful (2011) para coberturas secas, o coeficiente de decaimento de oxigênio obtido foi 0,005 que é intermediário aos valores obtidos neste trabalho.

Os dados do terceiro e último sensor (S03) foram utilizados para validação dos parâmetros obtidos por meio do S02 (Figura 4.a). Percebe-se, nos primeiros dias do experimento, que os dados do S03 ficaram entre as curvas correspondentes a 0,003 e 0,001 do tempo de decaimento. Após isso as concentrações de oxigênio são praticamente nulas.



(a)



(b)

Figura 4: a) Verificação dos parâmetros definidos em relação ao S03. b) Dimensionamento da camada M33 com base no fluxo de oxigênio para material protegido.

A Figura 4.b apresenta o fluxo de oxigênio para o material protegido em função da espessura da camada M33. A espessura de 1,2 metros se mostra efetiva por apresentar valores abaixo de 400 g/m² que é um valor de referência

para coberturas eficientes no bloqueio de oxigênio (O’Kane et al., 2002).

5. CONCLUSÕES

A espessura de 30 cm da camada de M33 não foi suficiente para bloquear o fluxo de oxigênio. Mesmo assim, o sistema de cobertura pode ser eficiente para espessuras de 1,2 metros.

O sistema é viável tanto do ponto de vista da redução da DAR quanto do seu caráter de sustentabilidade. Isso porque é um sistema simples de execução, empregando materiais recicláveis e passivo, ou seja, não requer inserção constante de energia e aditivos.

A metodologia empregada é fortemente indicada para dimensionamentos de coberturas secas, porque emprega o clima do local e avalia a cobertura antes de ser construída em escala real.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à CAPES e à FAPEMIG pelo apoio financeiro ao projeto APQ 02502/12.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). Grãos de solos que passam na peneira de 4.8 mm - Determinação da massa específica. NBR6508.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). Solo - Análise Granulométrica. NBR 7181.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). Solo – Determinação do Limite de Liquidez. NBR 6459.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. NBR 7180.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). Ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante. NBR13292.
- Collin, M. E Rasmuson, A. (1988). Gas diffusivity models for unsaturated porous media. *Soil Science America Journal*. 52: 1559-1565
- Das. B. M. (2007). *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 6ª Edição. São Paulo: Thomson Learning.
- Fredlund, D. G. E Xing, A. (1994). Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. Department of Civil Engineering. University of Saskatchewan. Saskatoon. Canada. 31(4):533-546.
- Geo-Slope International Ltd. (2007). “Vadose Zone Modeling with Vadose/W 2007 – An Engineering Methodology – Third Edition. March 2008. Calgary. Alberta. Canada.
- Mbonimpa, M.; Aubertin, M.; Dagenais, A. M.; Bussière, B.; Julien, M.; Kissiova, M. (2002). Interpretation of field tests to determine the oxygen diffusion and reaction rate coefficients of tailings and soil covers. CGS-IAH Conf. Niagara Falls.
- Motz, H.; Geiseler, J. (2001). Products of steel slag an opportunity to save natural resources. In: *Waste Management*. 21. Duisburg. Alemanha. p. 285-293.
- O’Kane, M.; Ayres, B.; Christensen, D.; Meiers, G. (2002). CANMET – CETEM Manual on Cover System Design for Reactive Mine Waste. OKC Report No. 689 – 01. Junho.
- Penman, H.L. (1948). “Natural evaporation from open water, bare soil and grass”, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A193*: pp. 120-145.
- Pereira de Almeida, R. P. ; Leite, A. D. L. ; Borghetti Soares, A. (2015). Reduction of acid rock drainage using steel slag in cover systems over sulfide rock waste piles. *Waste Management and Research*, v. 33, p. 353-362.
- Song, Q.; Yanful, E. K. (2011). Oxygen influx and geochemistry of percolate water from reactive mine waste rock underlying a sloping channelled soil cover. *Appl. Geochem*. doi:10.1016/j.apgeochem.2011.01.024.
- Van Genuchten, M. T. A. (1980). Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*; Madison. v.44. p.892-898.
- Wilson, G. W. (1990). Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems. Ph.D. Thesis. University of Saskatchewan. Saskatoon. Canada.
- Yanful, E.K. (1993). Oxygen diffusion through soil covers on sulfidic mill tailings. *ASCE. Journal of Geotechnical Engineering*. 119 (8):1207-1228.