

Análise da eficiência de geotêxtil em sistema de cobertura evapotranspirativa de depósito de rejeitos de carvão mineral para mitigação de Drenagem Ácida de Minas (DAM).

Marlon José de Lima

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Brasília, Brasil, marlonjose72@gmail.com

Ennio Marques Palmeira

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, palmeira@unb.br

Jorge Gabriel Zornberg

University of Texas at Austin, Austin-TX, EUA, zornberg@mail.utexas.edu

Carmen Dias Castro

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, carmendc14@hotmail.com

RESUMO: Neste trabalho são avaliados dois perfis de cobertura para depósito de rejeitos de carvão mineral. Em um dos perfis foram utilizados apenas solos enquanto no outro foi incluída uma camada de geotêxtil não tecido com gramatura de 400 g/m². Foram executados dois ensaios de infiltração utilizando colunas de PVC, cada coluna com diâmetro interno de 20 cm e espessura total de 120 cm, cada qual composta de 4 camadas de solo com 30 cm de espessura cada. Os sistemas foram submetidos a um processo de infiltração de água utilizando bombas peristálticas. Os resultados obtidos indicam que a presença do geotêxtil não tecido melhorou o desempenho do sistema de cobertura, aumentando a capacidade de retenção de água pelo perfil.

PALAVRAS-CHAVE: geotêxtil não tecido, drenagem ácida, barreira capilar.

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios tecnológicos para a atividade de mineração carbonífera é a disposição final de rejeitos de mineração. Rejeitos armazenados de forma imprópria, principalmente ao ar livre, podem estar sujeitos a fluxo de água devido a precipitações naturais. A água em contato com o rejeito de carvão pode resultar em reações químicas indesejáveis do ponto de vista ambiental, resultando na geração de Drenagem Ácida de Minas (DAM).

Drenagem Ácida de Minas (DAM) é gerada quando o mineral a ser explorado apresenta presença de sulfetos ou associados de sulfetos em sua rocha matriz, especialmente sulfetos de ferro como a pirita (Borguetti Soares *et al.*, 2009). Devido a infiltração de água e a presença de ar, os sulfetos reagem gerando elementos ácidos e poluentes. Esta água ácida pode carrear metais presentes na rocha matriz, contaminando

o solo e as águas subterrâneas. Pode também potencialmente causar sérios impactos ambientais, como: acidificação de águas superficiais; aumento da concentração de metais no solo, água superficial ou água subterrânea; redução na produtividade biológica de rios e contaminação do lençol freático (CETEM, 2001 *apud* Borguetti Soares *et al.*, 2009).

Este artigo tem origem em um trabalho conjunto desenvolvido entre pesquisadores da Universidade de Brasília (UnB) e do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) durante período de pesquisas realizado na University of Texas at Austin, Texas, EUA, no ano de 2012. O objetivo foi conferir o desempenho de uma cobertura seca, projetada para cobrir depósitos de rejeitos minerais, quando submetida a um fluxo descendente de água, simulando a ocorrência de precipitação pluviométrica.

A proposta original foi realizar um ensaio em coluna simulando uma cobertura

evapotranspirativa composta por camadas de solo orgânico (ou solo vegetal), argila e cinza grossa de carvão mineral, que funcionaria como uma barreira capilar à passagem do fluxo de água descendente. Foi então sugerido que fosse executada uma segunda coluna com os mesmos materiais granulares e disposição das camadas, porém com a presença de um geotêxtil não tecido. A intenção foi analisar de que forma a presença do geossintético alteraria o comportamento do sistema.

Este artigo apresenta dados sobre os materiais utilizados nos ensaios, a metodologia empregada e os resultados obtidos, e a diferença do comportamento hidráulico entre as duas colunas devido à presença do geotêxtil não tecido.

2 MATERIAIS E METODOLOGIA

2.1 Materiais utilizados na pesquisa

2.1.1 Materiais granulares

Uma solução tecnológica apropriada para a execução de um sistema de cobertura em células de disposição de rejeitos precisa levar em conta a disponibilidade de materiais na região onde será localizada a área de disposição. Para a execução dos ensaios de infiltração em coluna, a cinza grossa utilizada foi fornecida pela Usina Termoelétrica Tractebel (Capivari de Baixo/SC), cujo uso como material de cobertura de rejeitos de carvão foi estudado anteriormente por Ubaldo (2005) e Mendonça (2007). A argila e solo vegetal foram provenientes de uma região de mineração de carvão, pertencente à empresa Carbonífera Criciúma S.A.

A Tabela 1 apresenta os dados geotécnicos dos materiais granulares utilizados no ensaio. Os valores correspondem a ensaios realizados por Ubaldo (2005) e apresentados em Borghetti Soares *et al.*, 2009).

Tabela 1. Dados da caracterização geotécnica dos solos utilizados na pesquisa.

Solo	w _L (%)	w _p (%)	IP (%)	G _s
Argila	30,1	11,6	18,5	2,672
Solo Vegetal	35	20,4	14,6	2,654
Cinza	-	-	-	2,043

Devido à natureza da cinza grossa utilizada no ensaio, não foi possível a determinação de seus índices físicos segundo os procedimentos previstos nas normas NBR 6459 e NBR 7180. A Tabela 2 apresenta as distribuições de tamanhos de grãos das amostras de solos segundo a NBR 7181.

Tabela 2. Distribuição do tamanho de grãos dos solos analisados (Borghetti Soares *et al.*, 2009).

Solo	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	USC
Argila	-	29	41	30	CL
Solo Vegetal	-	35	27	38	CL
Cinza	8	79	13	0	SM

A Tabela 2 apresenta também a classificação dos materiais utilizados segundo critérios do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (USC). Tanto a Argila quanto o Solo Vegetal foram classificados como Argilas de Baixa Compressibilidade (CL). A Cinza de carvão mineral foi classificada como Areia Siltosa (SM).

Os valores de condutividade hidráulica saturada dos solos utilizados neste trabalho foram determinados por Mendonça (2007) e são apresentados na Tabela 3, retirada de Borghetti Soares *et al.*, 2009:

Tabela 3. Resultado dos testes de condutividade hidráulica saturada (adaptado de Borghetti Soares *et al.*, 2009)

Solo	k _{sat} (cm/s)
Argila	6,25 X 10 ⁻⁶
Solo Vegetal	5,22 X 10 ⁻⁶
Cinza	2,45 X 10 ⁻⁴

2.1.2 Geossintético

No ensaio de coluna onde se simulou a cobertura evapotranspirativa com a presença de uma camada de geossintéticos foi utilizado um geotêxtil não tecido, agulhado, com filamentos contínuos de poliéster. A Tabela 4 apresenta as propriedades do geotêxtil não tecido utilizado no ensaio, incluindo o diâmetro dos filamentos (d_f) e a condutividade hidráulica saturada.

Tabela 4. Propriedades do geotêxtil não tecido utilizado (de Lima, 2014).

Material	Gramatura (g/m ²)	d _f (mm)	k _{sat} (cm/s)
Poliéster	6,25 X 10 ⁻⁶	0,027	40

Notas: d_f = diâmetro dos filamentos, k_{sat} = condutividade hidráulica saturada.

2.2 Metodologia

2.1 Execução das colunas de infiltração

A Figura 1 apresenta um esquema ilustrativo sobre a montagem do ensaio de infiltração em coluna

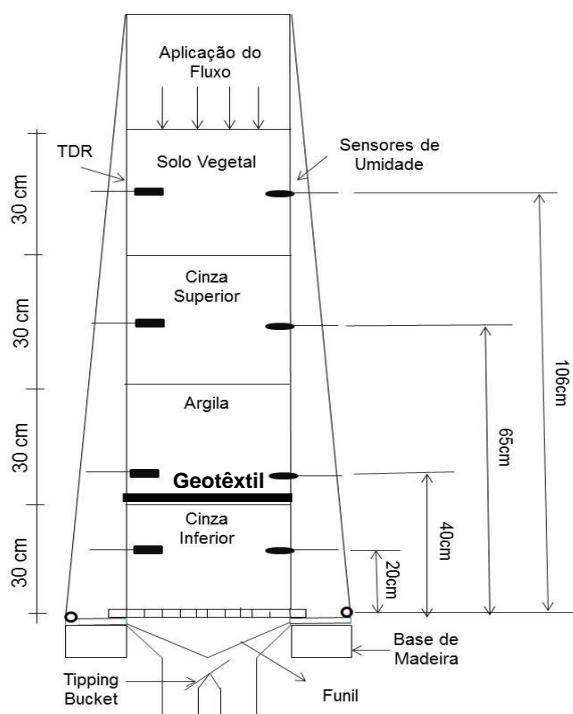


Figura 1. Esquema ilustrando a montagem do ensaio de infiltração em coluna.

A configuração utilizada no ensaio de infiltração em coluna simulou uma cobertura evapotranspirativa para ser utilizada em cobertura de área de disposição para rejeitos de mineração.

Em um sentido descendente, a camada de solo vegetal não compactado visou simular uma camada de cobertura de solo que permitisse a presença de cobertura vegetal, que pudesse ter a finalidade tanto para combater a erosão do solo quanto para melhorar a evapotranspiração de água do solo.

A instalação de duas camadas de cinza, a primeira acima da camada de argila compactada e

a segunda logo abaixo desta camada, teve como objetivo permitir o fluxo de água no sistema, mas auxiliar na manutenção da umidade retirada da camada de argila.

Uma vez que a camada de cinza grossa tem grãos com maiores diâmetros que a camada de argila, o contraste entre um material mais grosso (cinza grossa) e um material mais fino (argila) pode resultar em acúmulo de umidade devido ao fenômeno da barreira capilar.

Uma barreira capilar se caracteriza pelo contraste entre as propriedades hidráulicas de uma camada de solo fino sobreposto a uma camada de material granular, resultando em impedância hidráulica, que limita o movimento do fluxo de água. Neste sistema, a camada superficial de solo funciona como um depósito de umidade, retendo a água da chuva e devolvendo-a à atmosfera pelos processos naturais de evaporação e transpiração (De Lima, 2014).

Para o ensaio de infiltração com a presença do geotêxtil não tecido, o material foi instalado logo abaixo da camada de argila na interface com a camada inferior de cinza.

2.2 Equipamentos utilizados nos ensaios

Foram realizados dois testes paralelos, sendo um com a presença de geotêxtil não tecido com gramatura de 400 g/m² instalado entre a camada de argila e a camada de inferior de cinza grossa e um segundo apenas com os solos. As colunas foram feitas de acrílico com altura total de 160 cm, diâmetro interno de 19,7 cm e foram instaladas sobre um Periglas de plástico perfurado, apoiadas sobre uma estrutura de madeira. As colunas eram mantidas fixas por fios de aço.

A Figura 2 apresenta uma vista frontal das colunas utilizadas nos ensaios. Devido à sua altura, as colunas eram mantidas fixas por fios de aço e instrumentadas ao longo de seu perfil.

A compactação dos solos dentro das colunas foi realizada já com as colunas montadas na vertical. O sistema era apoiado em uma mesa de madeira e abaixo do perfil de solo foi instalada uma placa de acrílico perfurada que permitia que a água, uma vez tendo alcançado o fundo do perfil de solo, pudesse drenar para fora do sistema e ser armazenada em baldes. Este sistema permitia ainda ter noção do tempo que levava a frente de umidade para percorrer toda a altura da coluna.



Figura 2. Visão frontal do ensaio com as colunas em paralelo.

O fluxo de água descendente foi imposto ao sistema utilizando bombas peristálticas que permitiam uma vazão constante. Optou-se por simular chuva por gotejamento, sendo que na parte superior da camada de solo vegetal foi instalado um papel filtro com a função de distribuir uniformemente a umidade sobre a superfície da coluna. Este método de simular chuva por gotejamento foi utilizado com sucesso no trabalho de Azevedo (2012). A Figura 3 apresenta detalhe da bomba peristáltica utilizada e como o papel filtro foi empregado para distribuir a umidade sobre a superfície da camada superior da coluna.



Figura 3. Bomba peristáltica utilizada para impor fluxo de água ao sistema e detalhe da instalação de papel filtro na superfície da coluna.

O avanço da frente de molhagem ao longo das camadas de solo foi monitorado com sensores. Para medição da variação da umidade ao longo dos perfis foram utilizados TDRs (Time Domain Reflectometers) do modelo CS645, fabricadas pela Campbell Scientific (Fig. 4a). As sondas são constituídas por 3 hastes com 7,5 cm de comprimento e diâmetro de 0,159 centímetros. O espaçamento de centro

a centro entre a haste central e as varetas adjacentes exteriores é de 0,8 cm.

O sistema de aquisição de dados para o TDR CS645 é composto por um datalogger CR10X PC400 e software de suporte para datalogger da Campbell Scientific e são apresentados na Figura 4(b).



Figura 4. Detalhe do sensor para medida de umidade (a) e o datalogger para armazenamento dos dados (b).

Os ensaios foram realizados nas duas colunas ao mesmo tempo, mas cada qual constando com um sistema independente de imposição de fluxo de água e de monitoramento e registro de dados de umidade e sucção

Para o ensaio realizado sem a presença de geossintético foi aplicada uma taxa de fluxo constante de 0,39 ml/min ($3,8 \times 10^{-5}$ cm/s). A coluna com a presença de geossintético teve uma taxa de fluxo média de 0,37 ml/min ($3,38 \times 10^{-5}$ cm/s). A diferença entre a taxa de fluxo média em cada coluna pode ser desconsiderada para fins de comparação do comportamento dos diferentes sistemas.

Cada camada de solo foi compactada em uma umidade inicial diferente. Para fins de comparação foram consideradas as umidades volumétricas iniciais lidas pelos sensores TDR instalados. O geossintético foi instalado sem prévia molhagem, estando em sua umidade natural de armazenamento.

A Tabela 4 apresenta os valores iniciais de umidade volumétrica para cada perfil de solo, considerando as leituras realizadas pelos sensores instalados nas posições ilustradas na Figura 1. Neste estudo foram consideradas as leituras realizadas pelos TDR. Outros sensores de umidade e de sucção foram instalados nos perfis, mas os dados foram utilizados em outras análises que não são foco deste trabalho.

Tabela 4. Valores de umidade volumétrica inicial para cada camada de solo, leituras dos TDRs

Material	Coluna sem geossintético	Coluna com geossintético
	Umidade Volumétrica (m ³ /m ³)	Umidade Volumétrica (m ³ /m ³)
Solo vegetal	0,136	0,065
Argila	0,175	0,162
Cinza Superior	0,33	0,241
Cinza Inferior	0,25	0,29

3 RESULTADOS OBTIDOS

3.1 Comportamento hidráulico dos perfis.

São apresentados a seguir alguns gráficos que ilustram o comportamento das camadas de solo ao longo do processo de infiltração. Como já destacado, foi simulada uma situação de ocorrência de uma precipitação pluviométrica constante durante um certo período de tempo. A intenção foi descobrir o comportamento das camadas de solo e em especial do sistema composto pela camada de argila situada entre uma camada de cinza superior e outra inferior. A expectativa era que a diferença entre a granulometria da camada de argila e da camada de cinza superior resultasse em uma barreira capilar, retardando o avanço da frente de umidade da argila para a camada de cinza inferior, com aumento da capacidade de retenção de água da camada de argila, antes que houvesse o rompimento da frente de molhagem na interface entre a argila e a cinza.

O ensaio da coluna com a presença da camada de geotêxtil não tecido visou observar se a presença do geotêxtil não tecido na interface entre a camada de argila e a camada inferior de cinza iria agir como uma barreira ao fluxo de água, potencializando a capacidade da camada de argila em reter umidade antes que a frente de molhagem atravessasse a interface argila/cinza.

A Figura 5 apresenta as leituras de umidade volumétrica obtidas pelos TDRs durante o tempo em que a coluna de solo sem a presença

de geossintético foi sujeita a infiltração constante. Foi utilizada a sigla “SG” para nomear as camadas de solo da coluna “sem geotêxtil”. O valor de referência foi o volume total infiltrado em mililitros (ml) durante a realização do ensaio. Observa-se que cada camada de solo tem uma umidade volumétrica inicial diferente, cujos valores iniciais foram indicados na Tabela 4.

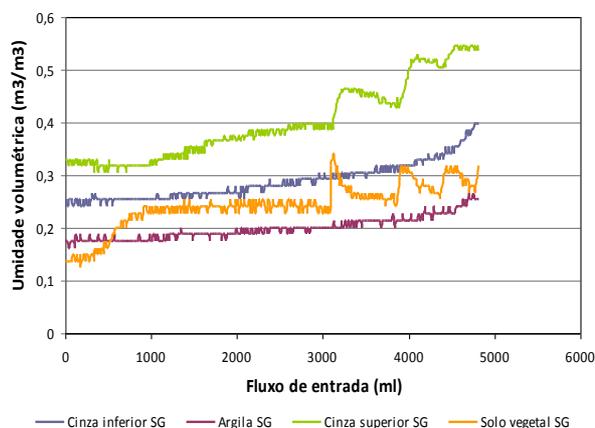


Figura 5. Valores de umidades volumétricas em função do volume total infiltrado para coluna sem presença de geotêxtil.

A Figura 6 apresenta os valores de umidade volumétrica registrados pelos TDRs em função do volume total de água infiltrado no sistema durante a realização do ensaio com a coluna com a presença do geotêxtil não tecido. Foi utilizada a sigla “CG” para se referir aos solos da coluna com a presença de geotêxtil.

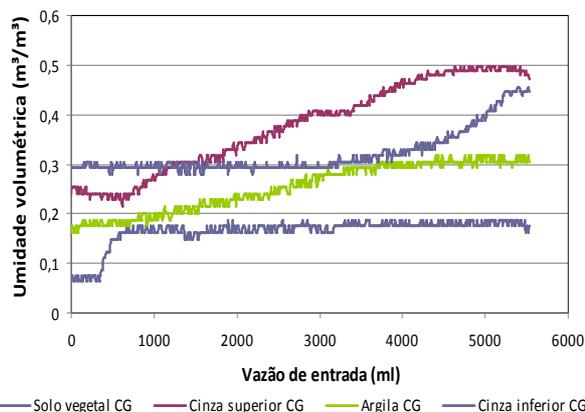


Figura 6. Valores de umidade volumétrica em função do volume total infiltrado para coluna com geotêxtil.

Devido às características próprias dos materiais e variações de umidade durante a

execução de cada camada, os valores de umidade volumétrica iniciais para a coluna com geotêxtil não tecido apresentaram diferenças em relação a coluna executada sem a presença de geotêxtil, como expresso na Tabela 4.

Considerando que os valores iniciais de umidade volumétrica para cada camada eram diferentes, uma forma de observar o comportamento do perfil como um sistema de cobertura de rejeitos foi considerar a variação da umidade volumétrica registrada pelos sensores de umidade (TDRs) em termos de porcentagem. A Figura 7 apresenta a variação da umidade volumétrica registrada pelos sensores ao longo do perfil de cobertura sem a presença do geotêxtil não tecido. Neste gráfico não foram consideradas as leituras da camada de solo vegetal para que fosse melhor observado o comportamento do sistema composto pelas camadas de cinza grossa e pela camada de argila, uma vez que espera-se que a diferença de granulometria entre estas camadas funcione como barreira ao avanço da frente de umidade dentro do sistema de cobertura.

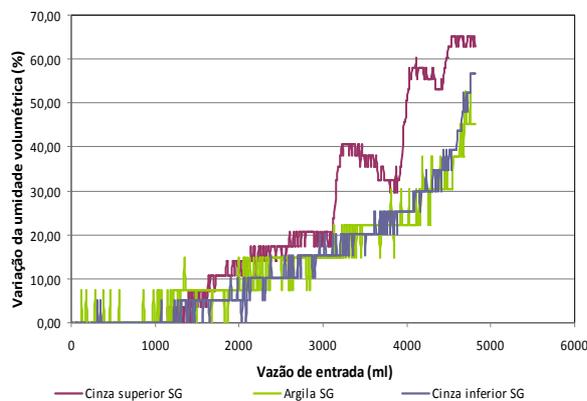


Figura 7. Variação da umidade volumétrica em função do volume total infiltrado para a coluna sem e geotêxtil.

A Figura 8 registra a variação da umidade volumétrica a partir da medição dos sensores TDR ao longo do perfil de cobertura com a presença do geotêxtil não tecido. Assim como no gráfico da Figura 7 não foram consideradas as leituras da camada de solo vegetal.

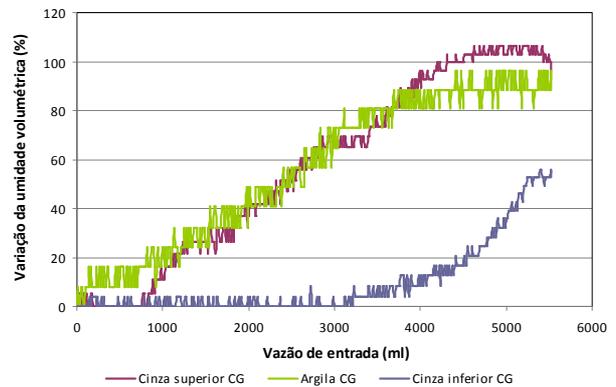


Figura 8. Variação da umidade volumétrica em função do volume total infiltrado para coluna com geotêxtil.

A Figura 9 faz um comparativo entre a variação da umidade volumétrica nas camadas de cinza grossa inferior e a camada de argila considerando os perfis com e sem a presença de geotêxtil.

Mesmo considerando a diferença nas umidades volumétricas iniciais, a taxa de variação em porcentagem pode servir como um referencial para a influência da presença do geotêxtil não tecido, tanto sobre a capacidade do sistema em reter água na camada de argila quanto o aumento da capacidade de retenção do fluxo total de água antes da frente de molhagem avançar através da camada de cinza inferior até alcançar a camada de rejeitos sob o perfil de cobertura.

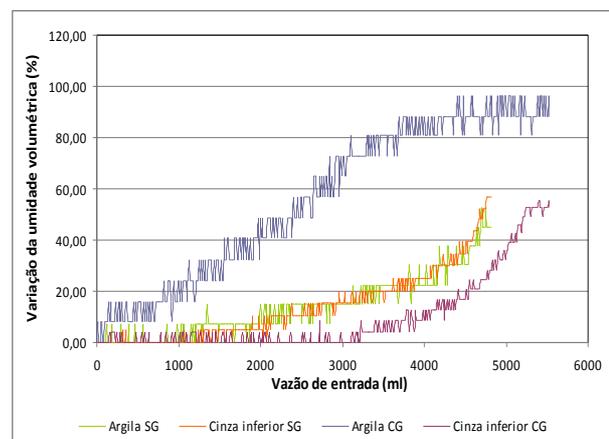


Figura 9. Gráfico comparativo entre a variação da umidade volumétrica nas camadas de argila e cinza grossa inferior para os perfis com e sem geotêxtil (CG e SG).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O principal objetivo dos ensaios realizados foi observar o comportamento de uma cobertura evapotranspirativa composta de 4 (quatro) camadas de diferentes solos. Analisando o perfil a partir de seu topo tem-se que a primeira camada com 30 cm de solo vegetal teria como função, em um sistema de cobertura de depósitos de rejeitos, permitir a presença de uma vegetação de pequeno porte com raízes pouco profundas, que poderia servir tanto para reduzir a energia dos eventos pluviais sobre o sistema quanto melhorar a capacidade de eliminar água pela evapotranspiração após uma ocorrência de chuva.

A camada superior de 30 cm de cinza grossa, compactada logo acima da camada de 30 cm de argila, tem como função tanto permitir a infiltração de água de chuva quanto permitir que a camada de argila mantenha sua umidade elevada no caso da ação de uma frente de molhagem.

A camada de argila tem a função de retardar o avanço da frente de molhagem. Porém uma vez que esta camada esteja próxima da saturação é interessante que permaneça o maior tempo possível neste estado. A presença de água nos vazios da camada de argila reduz o fluxo de ar e, por consequência, a quantidade de oxigênio que poderia alcançar a camada de rejeito, reduzindo a ocorrência da drenagem ácida.

No arranjo de cobertura proposto a camada de cinza grossa teria a função de impedir ou retardar o avanço da frente de molhagem. Esperaria-se que a diferença de granulometria entre a camada de argila e a camada de cinza grossa resultasse em um fenômeno de quebra capilar e o sistema funcionasse como uma barreira capilar, aumentando a capacidade de retenção de umidade pela camada de argila.

Comparando as Figuras 5 e 6 observa-se que no perfil de cobertura sem a presença de geossintético o intervalo entre o aumento registrado na umidade da camada de argila e o início do aumento da umidade na camada inferior de cinza grossa é bem menor que o registrado no perfil com a presença de geotêxtil. Isso indica que a diferença de granulometria entre a argila e a cinza grossa não foi suficiente para resultar em uma retenção da frente de umidade na camada de argila antes que a água

entrasse para a camada de cinza na base do perfil.

Considerando as Figuras 7 e 8, pode-se observar melhor a influência da presença do geotêxtil não tecido no comportamento hidráulico do perfil. Para o perfil com a presença do geotêxtil não tecido a frente de molhagem só altera os valores de umidade volumétrica na camada de cinza inferior após cerca de 2000 ml de água infiltrados no sistema. No perfil sem a presença do geotêxtil a frente de molhagem alcança a camada inferior de cinza com pouco mais de 1000 ml de água

A Figura 9, onde se comparam os comportamentos das camadas de argila e de cinza inferior para os perfis com e sem geotêxtil, pode-se observar que a presença do geotêxtil não tecido instalado na interface entre a argila e a cinza resulta em uma elevação considerável da umidade na camada de argila. Quando instalado o geotêxtil, a umidade da camada de argila sofre um acréscimo próximo de 90% antes que a frente de molhagem altere os valores de umidade volumétrica na camada de cinza. Já no perfil sem o geossintético não se percebe esta retenção da frente de molhagem e a alteração dos valores de umidade entre as camadas de argila e de cinza seguem o mesmo padrão de variação, indicando que não houve acréscimo na capacidade de retenção de água na camada de argila.

5 CONCLUSÕES

Pelos resultados apresentados pode-se inferir que a diferença de granulometria entre os materiais utilizados na execução do perfil, principalmente considerando as camadas de argila e cinza, não foram suficientes para que o sistema atuasse como uma barreira ao avanço da frente de molhagem.

A presença do geotêxtil não tecido na interface argila-cinza grossa agiu como uma barreira temporária à passagem do fluxo. O sistema com geotêxtil atuou como uma barreira capilar, aumentando a capacidade de retenção de água na camada de argila e permitindo que um maior volume de água fosse infiltrado no sistema antes que a camada de cinza inferior alcançasse a saturação e a água saísse pela base do perfil.

Pelo que se pôde constatar na comparação entre os desempenhos das duas colunas, a presença do geotêxtil não tecido levou o sistema a se comportar como uma barreira temporária, devido ao efeito de barreira capilar causado pelo contraste entre as dimensões de poros da argila e do geotêxtil.

Recomenda-se que sejam realizados mais ensaios com os mesmos materiais em diferentes condições de umidade e compactação para se aferir melhor o comportamento hidráulico da cobertura evapotranspirativa proposta.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade de Brasília, à Universidade do Texas-Austin, onde os ensaios foram realizados, e ao Centro de Tecnologia Mineral-CETEM pela cessão dos dados geotécnicos presentes neste artigo. Agradecem também à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Solo—Análise Granulométrica. NBR 7181, Rio de Janeiro, 1984a
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez.- Rio de Janeiro, 1984b, 6 p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Solo—Determinação do Limite de Plasticidade. NBR 7180, Rio de Janeiro, 1984c
- Azevedo, M. (2012) Anti-Capillary Barrier Performance of Wicking Geotextiles. Dissertação de Mestrado. Universidade do Texas/Austin. pp. 212.
- BORGHETTI SOARES, A. (2009); Ubaldo, Mariluce de Oliveira ; Souza, Vicente Paulo ; Soares, Paulo Sérgio Moreira ; Barbosa, Maria Claudia ; Mendonça, Rose Mary Gondim . Design of a Dry Cover Pilot Test for Acid Mine Drainage Abatement in Southern Brazil. I: Materials Characterization and Numerical Modeling. Mine Water and the Environment, v. 28, p. 219-231.
- CETEM (2001) Projeto Conceitual para Recuperação Ambiente da Bacia Carbonífera Sul Catarinense, vol I, RT/33/2000, Relatório Técnico para o SIESCEC, vol I, II e III. Rio de Janeiro, Brasil.
- De Lima, M.J. (2014). Utilização de geotêxtil não tecido como elemento constituinte de barreiras capilares. Tese de Doutorado, Publicação GTD - 095/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p.
- Mendonça, R. M.G. (2007) Estudo da Difusão de Oxigênio em Materiais de Cobertura. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil, COPPE-UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Ubaldo, M.O., (2005). Uso de Cinza de Carvão na Composição de uma Cobertura de Rejeitos de Mineração. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Civil, COPPE-UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.