

SÉRIE GESTÃO E PLANEJAMENTO AMBIENTAL

ARTIGO TÉCNICO Nº 2

Gestão de resíduos sólidos geradores de drenagem ácida de minas com o uso de coberturas secas

MARILUCE DE OLIVEIRA UBALDO

LAURA DE SIMONE BORMA

MARIA CLAUDIA BARBOSA

SÉRIE GESTÃO E PLANEJAMENTO AMBIENTAL

**Gestão de resíduos sólidos geradores de drenagem
ácida de minas com o uso de coberturas secas**

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Luiz Inácio Lula da Silva

José Alencar Gomes da Silva

Vice-Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Sérgio Rezende

Ministro da Ciência e Tecnologia

Luís Manuel Rebelo Fernandes

Secretário Executivo

Avílio Franco

Secretário de Coordenação das Unidades de Pesquisa

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Adão Benvindo da Luz

Diretor do CETEM

Ronaldo Luiz Correa dos Santos

Coordenador de Processos Metalúrgicos e Ambientais

Zuleica Carmen Castilhos

Coordenadora de Planejamento, Acompanhamento e Avaliação

João Alves Sampaio

Coordenador de Processos Minerais

Antônio Rodrigues de Campos

Coordenador de Apoio à Micro e Pequena Empresa

Arnaldo Alcover Neto

Coordenador de Análises Minerais

José da Silva Pessanha

Coordenador de Administração

SÉRIE GESTÃO E PLANEJAMENTO AMBIENTAL

ISSN 1808-0863 ISBN 978-85-61121-01-3

SPGA-04

COLEÇÃO ARTIGOS TÉCNICOS Nº 2

Gestão de resíduos sólidos geradores de drenagem ácida de minas com o uso de coberturas secas

Mariluce de Oliveira Ubaldo

Eng. Civil, M.Sc., doutoranda do Programa de Engenharia Civil da
COPPE/UFRJ, RIO DE JANEIRO, RJ.

Laura de Simone Borma

D.Sc., Professora Adjunta do curso de Engenharia Ambiental e do
Mestrado em Ciências do Ambiente da UFT, Palmas, TO.

Maria Claudia Barbosa

D.Sc., Professora Adjunta do Programa de Engenharia Civil da
COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

CETEM/MCT

2006

SÉRIE GESTÃO E PLANEJAMENTO AMBIENTAL

Paulo Sergio Moreira Soares

Editor

Roberto de Barros Emery Trindade

Subeditora

CONSELHO EDITORIAL

Ronaldo Luiz Correa dos Santos (CETEM), Maria Dionísia C. dos Santos (CETEM), Olavo Barbosa Filho (PUC-RJ), Afonso Rodrigues Aquino (USP), Josimar Ribeiro de Almeida (UFRJ).

A Série Gestão e Planejamento Ambiental tem como objetivo principal difundir trabalhos realizados no CETEM, ou em parceria com colaboradores externos, assim como trabalhos independentes considerados relevantes na área de gestão e planejamento ambiental e temas correlatos.

O conteúdo deste trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Jackson de Figueiredo Neto

Coordenação editorial

Maria Helena Hatschbach

Revisão

Ana Sofia Mariz

Capa, projeto gráfico e diagramação

Thatyana Pimentel Rodrigo de Freitas

Revisão de provas

Ubaldo, Mariluce de Oliveira

Gestão de resíduos sólidos geradores de drenagem ácida de minas com o uso de coberturas secas/ Mariluce O. Ubaldo, Laura, de Simone Borma, Maria Claudia Barbosa. — Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

51p. (Série Gestão e planejamento Ambiental, 04)

1. Gestão ambiental 2. Drenagem ácida. 3. Resíduos sólidos. I. Centro de Tecnologia mineral. II. Borma, Laura de Simone. III. Barbosa Maria Cláudia. IV. Série. V. Título

CDD – 658.408

SUMÁRIO

RESUMO/ABSTRACT ▶ 6

1 | INTRODUÇÃO ▶ 7

2 | DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS ▶ 9

3 | COBERTURAS SECAS ▶ 11

4 | SOLOS NÃO SATURADOS ▶ 17

4.1 | As fases do solo ▶ 17

4.2 | Potencial total da água no solo (P_t) ▶ 20

4.3 | Sucção ▶ 22

4.4 | Curva característica solo-água ▶ 26

4.5 | Condutividade hidráulica não saturada ▶ 32

5 | EVAPORAÇÃO ▶ 33

6 | O PROGRAMA SOILCOVER ▶ 37

7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS ▶ 45

8 | BIBLIOGRAFIA ▶ 46

RESUMO

A drenagem ácida de minas (DAM) é um dos problemas ambientais mais significativos enfrentados pela indústria da mineração. O uso de coberturas secas vem sendo internacionalmente apontado como uma alternativa para o controle da formação da DAM quando do fechamento de depósitos de resíduos de mineração. Este trabalho apresenta uma revisão dos conceitos básicos para o estudo da mitigação da drenagem ácida de minas através do uso de coberturas secas e descreve, de forma simplificada, as principais equações utilizadas pelo programa computacional SoilCover, que pode ser utilizado para o projeto de coberturas.

Palavras-chave: drenagem ácida de minas, cobertura seca, barreira capilar, solos não saturados, evaporação, programa SoilCover.

ABSTRACT

The acid mine drainage (AMD) is one of the most significant environmental problems confronted by the mining industry. To minimize the production of acidity in mining residues, one of the alternatives usually applied has been the so-called dry cover. This work presents a revision of the basic concepts for the study of the mitigation of the acid mine drainage through the use of dry cover and it describes the main equations used by the SoilCover program that can be used for dry cover projects.

Keywords: acid mine drainage, dry cover, capillary barrier, unsaturated soils, evaporation, SoilCover program.

1 | INTRODUÇÃO

A disposição inadequada de rejeitos e estéreis de mineração de carvão com potencial de acidez e conseqüente geração de drenagem ácida é um dos grandes problemas ambientais enfrentados pela indústria da mineração. Este problema tense tornado, nos últimos anos, uma questão bastante séria e vem requerendo estudos no sentido de encontrar soluções que venham minimizar os danos causados ao meio ambiente.

A execução de projetos ambientais integrados para recuperação de áreas mineradas é uma prática relativamente recente no mundo. Internacionalmente, os projetos desta natureza iniciaram-se, em maior escala, na década de 60, e no Brasil em meados da década de 70. Os primeiros trabalhos de recuperação preocupavam-se apenas com a recomposição paisagística e recuperação da cobertura vegetal. A partir da década de 90, o conceito de que um projeto de recuperação ambiental de áreas mineradas é uma tarefa multidisciplinar ganhou expressão internacional, e passou a incorporar o aprimoramento dos métodos de planejamento de lavra, beneficiamento mineral e disposição de rejeitos e estéreis (BARBOSA *et al.*, 2001).

A Drenagem Ácida de Minas (DAM) ocorre quando resíduos de minas (estéreis ou rejeitos provenientes do beneficiamento) ricos em sulfetos metálicos oxidam-se ao ficarem expostos à água e ao oxigênio. A geração das drenagens ácidas resulta na contaminação das águas superficiais e subterrâneas, inviabilizando o uso dessas para fins recreativos, agrícolas e de consumo. A drenagem ácida pode ocorrer nas minerações que envolvem a exploração comercial de minerais como cobre, níquel, urânio, carvão e ouro. No Brasil, um dos maiores problemas de geração de acidez ocorre na mineração de carvão no sul do país, em especial no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Devido ao tratamento inadequado dos rejeitos, a região carbonífera de Santa Catarina foi enquadrada como área crítica em termos de poluição ambiental (ALEXANDRE *et al.*, 1995).

No fechamento de áreas mineradas que apresentam problemas de produção de acidez, dois aspectos devem ser levados em conta: primeiro, o fato de que seus impactos não se restringem à área minerada, podendo atingir corpos hídricos superficiais e subterrâneos distantes do empreendimento e, segundo, que as reações químicas envolvidas no processo ocorrem por muitos anos, mesmo depois de esgotado o depósito mineral.

Para minimizar a geração de acidez nas pilhas de resíduos de mineração, as alternativas normalmente utilizadas têm sido as chamadas coberturas úmidas e coberturas secas. A cobertura úmida consiste no cobrimento da área do depósito com água e, a cobertura seca, no cobrimento da área do depósito com camadas de solo. Em ambos os casos, o objetivo é diminuir a entrada de oxigênio para dentro do material reativo, minimizando assim o processo gerador de acidez. No caso das coberturas secas, elas têm também o objetivo de minimizar a entrada de água. Seu desempenho depende fortemente dos materiais utilizados e das condições climáticas. Um tipo de cobertura seca que vem sendo sugerido para climas úmidos é aquela que utiliza o princípio de barreira capilar.

Este trabalho tem como finalidade apresentar conceitos técnicos básicos para o apoio à gestão de resíduos sólidos em instalações de mineração, com ênfase na aplicação de coberturas secas para mitigação da geração de drenagens ácidas. Para isto são tratados, a seguir, os seguintes temas:

- ▶ Drenagem Ácida de Minas (DAM)
- ▶ Cobertura seca
- ▶ Solos não saturados
- ▶ Evaporação
- ▶ Programa SoilCover

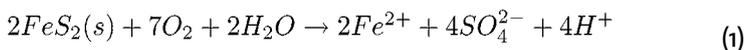
2 | DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS

O termo Drenagem Ácida de Minas (DAM) é utilizado para descrever a drenagem que é afetada pela oxidação de minerais sulfetados quando expostos à presença de oxigênio e água.

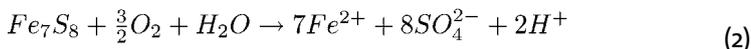
Ocorrendo em depósitos de resíduos de mineração (pilhas de estéril ou rejeitos) ricos em sulfetos de ferro (principalmente pirita) expostos à oxidação, a DAM é a principal responsável pela diminuição do pH das águas que percolam pelo depósito, aumentando o potencial de solubilização dos metais pesados eventualmente contidos em materiais com os quais a DAM entra em contato.

As reações responsáveis pela produção da drenagem ácida de minas podem ser expressas pelas seguintes equações estequiométricas, (MEND 2.20.1, 1994):

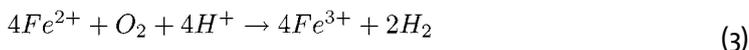
Oxidação da pirita:



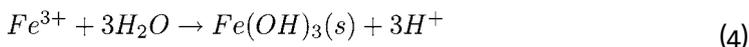
Oxidação da pirrotita:



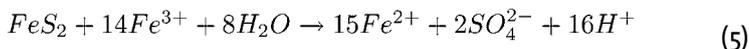
Oxidação do ferro:



Precipitação do ferro:



Dissolução da pirita pelo íon Fe^{3+} :



As equações (1) e (2) representam as equações estequiométricas da oxidação da pirita e da pirrotita, respectivamente. Segundo Mend 2.20.1 (1994), tanto a oxidação da pirita como da pirrotita podem ser catalisadas por bactérias, sendo a espécie *Thiobacillus Ferrooxidans* a mais importante. A equação (3) de oxidação do ferro depende do

valor do pH, sendo que para baixos valores de pH a reação ocorre mais lentamente (EPA, 1994), podendo também ser catalisada por bactérias. A precipitação do ferro, como mostra a equação (4), acontece devido ao fato de o ferro não se manter em solução com pH acima de três, (MEND 2.20.1, 1994). A dissolução da pirita pelo íon Fe^{3+} , equação (5), juntamente com a oxidação do ferro, equação (3), constituem o ciclo de dissolução da pirita.

Levando-se em conta as equações estequiométricas acima, fica evidente que a oxidação de minerais sulfetados e a produção da DAM ocorrem devido à presença de dois constituintes básicos: oxigênio e água. O principal componente responsável pela oxidação dos sulfetos metálicos é o oxigênio gasoso. A água de chuva, em abundância, é a responsável pela formação da drenagem ácida, através da solubilização dos produtos da oxidação. Para efeito de controle da drenagem ácida, alternativas são construídas de forma a minimizar a entrada de oxigênio e água de chuva para dentro do material reativo.

3 | COBERTURAS SECAS

As coberturas secas são muito utilizadas na prevenção e controle da DAM. Sua adoção é considerada um método de controle da drenagem ácida “na fonte”, pois minimiza a entrada dos principais agentes responsáveis pela oxidação: o oxigênio e a água (SOUZA *et al.*, 2003).

Embora as coberturas secas sejam geralmente constituídas de camadas de solos de diferentes propriedades, essas camadas podem ser substituídas por camadas de materiais alternativos, como geossintéticos ou resíduos provenientes de outras atividades, desde que esses materiais apresentem as propriedades necessárias para esta substituição.

O principal objetivo das coberturas secas é impedir a formação da drenagem ácida, seja formando uma barreira física (barreira de transporte de oxigênio, barreira hidráulica e barreira capilar), seja formando uma barreira química (barreira de consumo de oxigênio e barreira de inibição da reação). A Tabela 1 apresenta a classificação das coberturas secas de acordo com o papel que elas exercem para prevenir a DAM.

TABELA 1: Classificação das coberturas secas de acordo com o papel que exercem para efeito de inibição da DAM (modificado de BORMA *et al.*, 2002)

Classificação	Papel principal na inibição da DAM
Barreira ao transporte de oxigênio	Reter a umidade e fornecer uma barreira com baixo coeficiente de difusão de oxigênio.
Barreira hidráulica	Impedir, por meio de uma camada de material de baixa permeabilidade, o fluxo de água para dentro do resíduo.
Barreira capilar	Impedir, simultaneamente, o transporte de água e oxigênio para dentro do resíduo, por meio de superposição de camadas de materiais com diferentes propriedades hidráulicas.
Barreira de consumo de oxigênio	Fonte de consumo de oxigênio de forma a fornecer baixa concentração de oxigênio na interface cobertura/resíduo.
Barreira de inibição da reação	Inibir reações, neutralizando o pH.

No presente trabalho serão detalhadas apenas as coberturas que formam uma barreira física para o controle da DAM: barreira ao transporte de oxigênio, barreira hidráulica e barreira capilar.

BARREIRA DE TRANSPORTE DE OXIGÊNIO

Uma camada de solo argiloso compactado que mantenha um elevado grau de saturação, independente da condição climática, pode funcionar como barreira ao transporte de oxigênio.

Uma das formas mais significativas de transporte de oxigênio através de camadas de solos (ou materiais alternativos) dá-se por meio da difusão (YANFUL, 1993). Sob condições não saturadas, o fluxo difusivo do oxigênio no solo ocorre inteiramente na fase gasosa. Quando o teor de umidade aumenta, a área da seção transversal

e a tortuosidade da fase gasosa diminuem, reduzindo o coeficiente de difusão efetivo e, conseqüentemente, o fluxo de oxigênio. Quando o solo se encontra em condição saturada, o fluxo difusivo ocorre inteiramente na fase de solução, o que o torna até quatro ordens de magnitude menor que o fluxo sob condições secas (NICHOLSON, 1989).

Segundo Yanful (1993), experimentos em laboratório têm demonstrado que o coeficiente de difusão de oxigênio em uma camada de solo é inversamente proporcional ao grau de saturação de água dessa camada. Valores de coeficiente de difusão do oxigênio da ordem de $8 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ foram reportados, pelo referido autor, para valores de grau de saturação entre 95% e 85%.

BARREIRA HIDRÁULICA

Para que uma camada de solo argiloso compactado tenha um bom funcionamento como barreira hidráulica, ou seja, impedindo o fluxo de água para dentro do depósito, o ideal é que esta camada tenha uma condutividade hidráulica igual ou inferior a $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ (SHACKELFORD, 1997).

BARREIRA CAPILAR

A barreira capilar é constituída de camadas de solos ou materiais alternativos e funciona simultaneamente como uma barreira ao transporte do oxigênio (impedindo que o oxigênio atravesse a cobertura) e como barreira hidráulica (impedindo a infiltração de água de chuva).

O funcionamento de uma barreira capilar baseia-se no contraste da condutividade hidráulica não saturada de camadas de solos superpostas (SHACKELFORD, 1997). Uma camada de material fino sobre uma camada de material granular forma uma barreira capilar, desde que ambos os materiais estejam na condição não saturada (Figura 1).

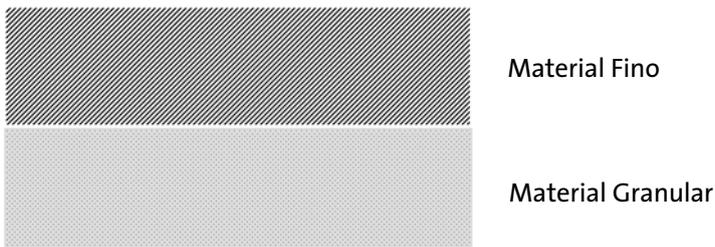


FIGURA 1: Esquema de uma barreira capilar simples.

Sob condição não saturada, o solo granular abaixo do solo fino apresenta baixo teor de umidade volumétrica e, conseqüentemente, baixa condutividade hidráulica não saturada que limita o movimento de fluxo de água descendente da camada de solo fino. A camada de solo fino, por sua vez, se comporta como um reservatório onde a água pode ser armazenada pelas forças capilares e o alto grau de saturação desta camada de material fino forma uma eficiente barreira contra o fluxo de oxigênio (AUBERTIN *et al.*, 2006). No entanto, na parte superior da camada de solo fino, pode haver a perda de água por evaporação. Para evitar isso, constrói-se uma barreira capilar dupla (Figura 2). Nesse caso, a camada de material granular superior impede que a água migre por ascensão e seja perdida para a atmosfera por evaporação.

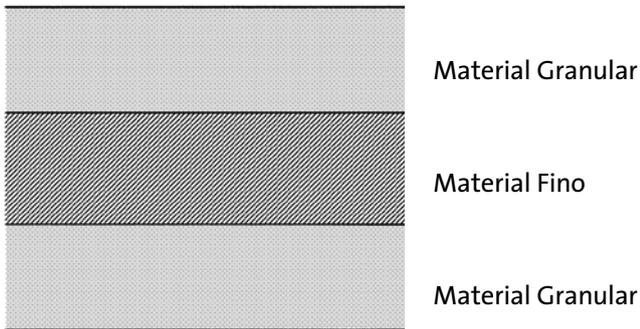


FIGURA 2: Esquema de barreira capilar dupla.

Nesse tipo de barreira, a camada de material granular superior exerce duas funções importantes: na época de seca ela impede que a água armazenada na camada de material fino migre por capilaridade para as camadas de topo, minimizando assim o efeito de perda de umidade por secagem e evaporação. Na época de chuva, essa camada funciona como um dreno, conduzindo lateralmente a água que infiltra na cobertura e prevenindo, dessa forma, a saturação da camada de material fino. Esse efeito pode ser maximizado por meio da inclinação da superfície, que favorece o escoamento lateral. Isso é bastante importante para a maioria dos climas das regiões brasileiras, que apresentam períodos de seca bem definidos no inverno e elevadas precipitações no verão (BORMA *et al.*, 2002; SOUZA *et al.*, 2003).

Sobre a barreira capilar dupla é usual adicionar-se ainda camadas que têm por finalidade proteger a barreira capilar, fornecer suporte à vegetação e, ao mesmo tempo, controlar o balanço hídrico (BORMA *et al.*, 2002). A Tabela 2 apresenta os possíveis componentes de um sistema de cobertura, nesses moldes.

TABELA 2: Possíveis componentes em um sistema de cobertura (modificado de SOUZA *et al.*, 2003).

Camadas	Função	Considerações
Camada superficial	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Prevenir erosão; ▶ Promover evapotranspiração; ▶ Promover o crescimento da vegetação. 	Camada indispensável ao sistema de cobertura.
Camada de proteção	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Armazenar água; ▶ Proteger as camadas inferiores contra o ressecamento e contra a penetração de animais e raízes. 	Pode ser substituída por uma camada superficial mais espessa.
Camada de material granular	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Promover a drenagem da água acumulada nas camadas superiores reduzindo o gradiente hidráulico na camada argilosa; ▶ Impedir que a camada argilosa perca água por capilaridade. 	Utilizada quando excessivas quantidades de água passam pela camada superficial e de proteção, ou quando forças de percolação são excessivas.
Camada de material argiloso	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Reduzir a infiltração de água e oxigênio para o interior do rejeito. 	Camada mais importante do sistema de cobertura.
Camada de material granular	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Impedir a migração de água para dentro do resíduo e manter um alto grau de saturação da camada acima. 	Camada necessária quando se pretende construir uma barreira capilar.

4 | SOLOS NÃO SATURADOS

Os solos são encontrados na natureza como uma mistura de várias fases. Uma mistura de partículas sólidas e ar constituem o solo seco, enquanto uma mistura de partículas sólidas e água constituem um solo saturado. Entre estes dois extremos têm-se os solos não saturados, os quais se constituem de partículas sólidas, água e ar em percentagens volumétricas diferentes.

As teorias tradicionais da mecânica dos solos foram desenvolvidas admitindo que o solo encontra-se na condição saturada. Mas, na prática, esta condição de saturação não é encontrada sempre. Quando as teorias tradicionais da mecânica dos solos são aplicadas para solos não saturados, o engenheiro geotécnico geralmente encontra dificuldades para obter uma solução satisfatória nos problemas práticos de engenharia (LEE e WRAY, 1995). Por este motivo o estudo de solos não saturados tem sido objeto de muitas pesquisas.

4.1 | As fases do solo

O solo é comumente referido como um sistema de três fases: fase sólida, fase líquida e fase gasosa. Recentemente, uma quarta fase foi incluída, a fase de interação ar-água, também chamada membrana contráctil (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

A massa e o volume de cada fase podem ser esquematicamente representados pelo diagrama de fases. A Figura 3 (a) mostra um diagrama simplificado de três fases, onde podemos observar que a membrana contráctil faz parte da fase água. A Figura 3 (b) mostra um diagrama mais completo de quatro fases.

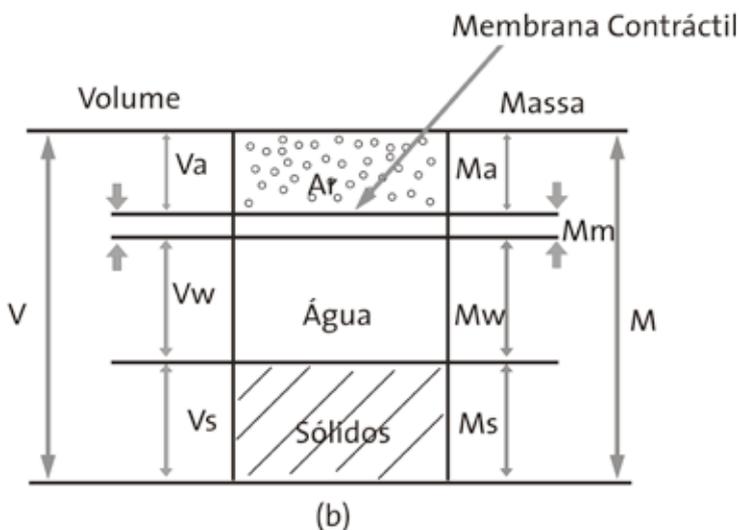
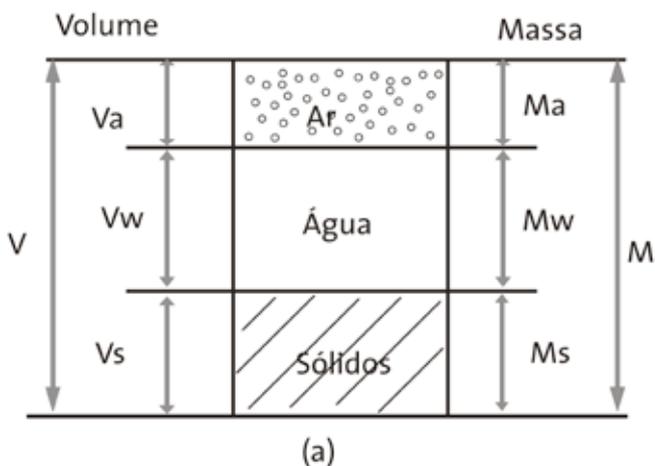


FIGURA 3: Diagrama de fases de um solo não saturado, (a) diagrama simplificado de três fases; (b) diagrama completo de quatro fases (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

FASE SÓLIDA

A fase sólida do solo é representada pelas partículas de minerais, podendo apresentar características altamente variáveis como tamanho, forma, textura, composição mineralógica, configuração cristalográfica, etc.

Um aspecto importante a ser considerado é a superfície específica, à qual estão associados o tipo e o predomínio das forças que atuam na superfície das partículas de solo. Quanto mais fina a partícula de solo, maior será a superfície específica, e maior será a intensidade de forças elétricas atuando na superfície destas partículas.

As características e propriedades das partículas sólidas, quanto à forma e tamanho, são determinantes no comportamento do solo. Dentro da faixa de pressões normalmente aplicadas nos solos, sob o ponto de vista da engenharia civil, as partículas sólidas são consideradas incompressíveis.

FASE LÍQUIDA

A fase líquida é composta fundamentalmente de água, sais e ar dissolvido. A água dos poros tem sido classificada em três tipos: água gravitacional, água capilar e água adsorvida. A água gravitacional é a água que está livre para se mover por entre os poros, sob ação da gravidade. A água capilar é aquela que permanece no solo devido às forças de capilaridade desenvolvidas no contato água – partícula de solo, e se movimenta dentro da massa de solo por ação destas forças. O fenômeno de capilaridade só existe quando o solo está na condição não saturada. A água adsorvida é a água que se adere à superfície da partícula, através de mecanismos de adsorção, devido à existência de cargas elétricas negativas nessa superfície. Este tipo de água faz parte da fase sólida e não pode ser separada por forças hidrodinâmicas. Sob o ponto de vista da hidrodinâmica, a água capilar e a água gravitacional formam a água livre (JUCÁ, 1990).

A água pode apresentar variações na sua densidade e na sua viscosidade devido às diferenças de temperatura e pressão. Para as condições usuais do sistema solo-água, as variações de densidade e viscosidade são desprezíveis em relação às variações de pressão, podendo assim ser considerada como incompressível (SCOTT e WESLEY, 1965).

FASE GASOSA

A fase gasosa, constituída por ar livre e água em forma de vapor, está presente no espaço poroso não ocupado pela água, quando o solo se encontra na condição seca ou não saturada.

INTERFACE AR-ÁGUA

A interface ar-água, também conhecida como membrana contrátil, é composta por uma película de propriedades diferentes daquelas da água e do ar que a compõem. No entanto, as relações massa-volume consideram o solo como um sistema trifásico, fazendo com que o volume da membrana contrátil seja desprezado e seu peso incorporado ao peso da água (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

4.2 | Potencial Total da Água no Solo (P_t)

Potencial total da água no solo é definido como o trabalho realizado para levar, reversível e isotermicamente, uma quantidade infinitesimal de água pura, desde um ponto situado a uma altura conhecida, sob condição atmosférica, até um ponto considerado da água do solo (JUCÁ, 1990).

A equação (6) apresenta o potencial total da água no solo, cujos componentes são: o potencial gravitacional, o potencial osmótico, o potencial de pressão e o potencial matricial. Outros componentes podem ser incluídos, como o potencial de consolidação ou o potencial térmico, porém, serão descartados por terem menor importância no comportamento geotécnico de solos não saturados.

$$P_t = P_g + P_{os} + P_p + P_m \quad (6)$$

Onde:

P_t = Potencial total;

P_g = Potencial gravitacional;

P_{os} = Potencial osmótico;

P_p = Potencial de pressão;

P_m = Potencial matricial.

4.2.1 | POTENCIAL GRAVITACIONAL (P_g)

Considerando apenas o campo gravitacional, a água tem uma energia potencial gravitacional que depende da posição na qual ela se encontra em relação a um dado plano referencial (REICHARDT, 1987). O potencial gravitacional tem valor zero no plano de referência, é positivo acima dele e negativo abaixo dele. O plano de referência é o estado-padrão para a gravidade e o plano mais comumente escolhido é a superfície do solo.

4.2.2 | POTENCIAL DE PRESSÃO (P_p)

O potencial de pressão é medido em relação à condição padrão, tomada como sendo a da água submetida à pressão atmosférica local e, nestas condições, admite-se que o potencial de pressão seja igual a zero. O potencial de pressão considera somente pressões manométricas positivas (acima da pressão atmosférica), portanto, este componente só existirá se existir água livre exercendo carga hidráulica sobre solo saturado (REICHARDT, 1987). Quando o solo estiver na condição não saturada, o potencial mátrico passará a atuar no lugar do potencial de pressão.

4.2.3 | POTENCIAL OSMÓTICO (P_{os})

O potencial osmótico surge em função da diferença de composição entre a água do solo (presença de sais minerais e substâncias orgânicas) e a água pura. Esta diferença de composição só causará movimento de água pura quando o sistema estiver “separado” por uma membrana semipermeável. Membrana semipermeável é aquela que só permite passagem de solvente (no caso a água pura), não

deixando passar o soluto. Como no solo, de uma maneira geral, não existem membranas semipermeáveis, qualquer diferença de potencial osmótico que se estabeleça provoca um movimento de solutos (que se redistribuem) e um movimento desprezível de água (REICHARDT, 1987).

4.2.4 | POTENCIAL MATRICIAL OU MÁTRICO (P_m)

O potencial mátrico é resultante tanto do efeito da capilaridade quanto do efeito de adsorção que surgem da interação entre as partículas sólidas e a água do solo.

Quando o solo se encontra na condição saturada, a componente matricial é nula. À medida que o solo vai se tornando não saturado, o efeito da capilaridade começa a atuar e o potencial mátrico torna-se negativo. Para altos valores de umidade, a capilaridade é o principal fenômeno que determina o potencial mátrico. Nestas condições, o arranjo poroso determinado pela estrutura, textura e composição das partículas é de enorme importância. Para baixos valores de umidade, o fenômeno de capilaridade deixa de ter importância e a adsorção passa a governar os valores de potencial mátrico (REICHARDT, 1987).

4.3 | Sucção

Sucção do solo é a quantidade de energia que representa a capacidade do solo de reter água. Quando a água livre migra dentro do solo, ela será retida ou adsorvida por esse. Para liberar a água adsorvida, uma energia externa tem que ser aplicada para contrapor-se à força de retenção da água. A energia aplicada por unidade de volume de água é conhecida como sucção do solo (LEE e WRAY, 1995).

A sucção total é igual ao potencial total quando desprezados os potenciais de pressão e gravitacional (JUCÁ, 1990). Portanto, a sucção do solo (Ψ), conforme descrito na equação (7), tem duas componentes: a sucção mátrica (Ψ_m), definida como a capacidade de retenção de água devido à matriz do solo, ou seja, do tipo de partículas

e seu arranjo estrutural, e a sucção osmótica (Ψ_{os}), definida como a capacidade de retenção devido aos sais dissolvidos na água do solo. O efeito total destas duas componentes de sucção é conhecido como sucção total ou, simplesmente, sucção do solo.

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_{os} \quad (7)$$

A sucção mátrica (Ψ_m), que corresponde ao potencial mátrico em termos de pressão, também pode ser definida como a diferença entre a pressão do ar (u_a) e a pressão da água (u_w) presentes nos poros do solo, como mostra a equação 8.

$$\Psi_m = u_a - u_w \quad (8)$$

Supondo-se que os vazios do solo estejam em contato com a pressão atmosférica (considerada igual a zero, para efeito de referência), a pressão do ar terá o mesmo valor da pressão atmosférica. Sendo assim, a sucção matricial será representada pela pressão negativa da água nos poros.

4.3.1 | MEDIÇÃO DA SUCÇÃO DO SOLO

Existem diversos métodos para determinação da sucção do solo, tanto em campo, quanto em laboratório. A Tabela 3 apresenta um resumo de algumas técnicas de medidas de sucção do solo.

TABELA 3: Técnicas de medida de sucção (MARINHO E PEREIRA, 1998).

Método	Tipo de sucção medida	Faixa de medida (KPa)
Tensiômetro	Matricial e Total	0 – 90
Translação de eixos	Matricial	0 – 1500
Condutividade térmica	Matricial	0 – 400
Condutividade elétrica	Matricial e Osmótica	20 – 1500
Pisicrômetro	Total e Osmótica	100 – 8000
Papel-filtro	Matricial e Total	0 – 29000

MÉTODO DO PAPEL-FILTRO

A técnica do papel-filtro tem sido muito utilizada para obtenção da curva característica por ser um método de fácil execução, de baixo custo e por cobrir uma faixa de sucção relativamente ampla. Segundo Feuerharmel *et al.* (2004), a desvantagem desta técnica é a necessidade de extremo cuidado na sua execução. Segundo Swarbrick (1995), a grande vantagem deste método é que o papel-filtro é adaptado ao valor da sucção do solo, ao invés do solo se adaptar ao valor da sucção aplicada.

O uso do papel-filtro como material absorvente deu mais credibilidade ao método, visto que o processo industrial envolvido na produção do mesmo garante que as características de absorção de cada papel-filtro sejam as mesmas, independente da caixa ou lote usado (FAWCETT e COLLIS-GEORGE, 1967 citado em MARINHO, 1997).

A realização do ensaio consiste em colocar o papel-filtro em contato (direto ou indireto) com o solo. Espera-se um tempo para que a umidade do papel-filtro equilibre-se com a umidade do solo. Mede-se a umidade do papel-filtro e infere-se a sucção do solo segundo uma curva de calibração do papel-filtro.

Este tempo de equilíbrio entre a umidade do papel filtro com o solo vem sendo estudado por diversos autores. Feuerharmel *et al.* (2004) sugerem o tempo de equalização de sete dias para valores de sucção maiores que 10.000 KPa e quatro dias para valores de sucção menores que 10.000 KPa. Marinho (1997) salienta que o tempo de equalização está relacionado com o tipo e nível de sucção. O mesmo autor sugere o tempo de sete dias quando se está medindo sucção mátrica, independentemente do nível de sucção. Segundo a norma ASTM D 5298-03, o tempo mínimo de equalização entre o solo e o papel-filtro é de sete dias.

O procedimento do método do papel-filtro é bastante simples, entretanto, requer bastante cuidado na determinação do teor de umidade do papel-filtro. Segundo Chandler e Gutierrez (1986), o tempo de pesagem do papel-filtro deve ser de aproximadamente 30s, para evitar que o mesmo ganhe ou perca umidade para a at-

mosfera. Segundo Marinho (1994-a), o tempo de transferência do papel-filtro para uma cápsula fechada ou um saco plástico auto-selante deve ser de no máximo 5s.

Com este método pode-se medir, em laboratório, tanto a sucção total quanto a sucção matricial. A diferença entre os dois tipos de medidas de sucção está no tipo de contato entre o solo e o papel-filtro. Quando o papel-filtro estiver colocado diretamente sobre o solo (contato direto), a sucção medida será a matricial. Quando o papel-filtro não estiver em contato direto com o solo, o ar que fica entre o solo e o papel-filtro atua como uma membrana semipermeável para os sais, permitindo apenas o fluxo de vapor d'água, portanto, a sucção medida será a sucção total. Para não permitir o contato direto do papel-filtro com o solo, recomenda-se colocar um disco perfurado, normalmente com o mesmo diâmetro do corpo de prova, entre o solo e o papel-filtro.

Apesar de existir uma norma (Norma ASTM D 5298-03) com o procedimento padrão para a realização do ensaio do papel-filtro. Existe muita divergência entre pesquisadores do meio em relação a alguns pontos desta norma, tais como:

- i) A referida norma sugere que o papel-filtro seja seco em estufa no mínimo por 16h antes do seu uso. Mas, segundo Marinho (1994-b), este procedimento pode afetar as características de adsorção do papel-filtro, resultando na alteração da curva de calibração.
- ii) Segundo a mesma norma, para medir a sucção mátrica são colocados, em contato com o solo, três papéis-filtro entre duas amostras de solo. A sucção é medida em função do papel-filtro do meio e os outros dois têm a finalidade de proteger o papel-filtro central contra a aderência do solo no papel-filtro. Hamblin (1981), citado em Marinho (1994-b), observou que o tempo de equilíbrio do papel-filtro em contato com o solo depende do número de papéis usados. A mesma autora sugere o uso de um único papel-filtro, considerando que o erro devido à aderência do solo ao papel-filtro no final do processo é menor que os erros ocorridos devido ao longo tempo de equalização, ou devido às tentativas de limpeza do papel-filtro.

Segundo Hamblin (1981) citado em Chandler e Gutierrez (1986) e Marinho e Pereira (1998), na maioria dos casos não é necessário tratamento contra decomposição biológica do papel-filtro, particularmente em solos não orgânicos onde o tempo de equilíbrio é de no máximo 15 dias.

Uma curva de calibração que pode ser usada para o papel-filtro Whatman nº 42 é a curva proposta por Chandler *et al.* (1992) apresentada pelas equações (9) e (10).

$$\Psi = 10^{(6,05 - 2,48 \text{ LOG } (w))} \text{ para } W > 47\% \quad (9)$$

$$\Psi = 10^{(4,84 - 0,0622 w)} \text{ para } W \leq 47\% \quad (10)$$

Sendo:

Ψ = Sucção (KPa);

W = Umidade do papel-filtro (%).

4.4 | Curva característica solo-água

Define-se como curva característica solo-água a relação entre a quantidade de água presente nos poros e a sucção do solo. A quantidade de água pode ser medida em relação aos teores de umidade volumétrica (θ), gravimétrico (W) ou grau de saturação (S). Já a sucção pode ser estabelecida em termos de sucção mátrica (Ψ_m) ou sucção total (Ψ). Para elevados valores de sucção (acima de 1500 KPa), a sucção mátrica e a sucção total podem ser consideradas equivalentes (FREDLUND e XING, 1994). A “curva característica solo-água” é também denominada “curva de retenção da água do solo” ou “curva de sucção”.

Para se obter a curva característica em laboratório, pode-se utilizar dois procedimentos: o umedecimento do solo, que consiste em tomar uma amostra seca ao ar e umedecê-la gradualmente, provocando redução do potencial matricial; ou a secagem do solo, que consiste em tomar uma amostra de solo na condição saturada e expulsar a água. A perda de água do solo pode ser obtida mediante a aplicação de pressões na amostra ou deixando a amostra evaporar ao tempo.

A Figura 4 apresenta curvas características típicas para areia e argila bem como os parâmetros mais importantes relacionados à curva característica, a saber: sucção de entrada de ar (Ψ_b), denominada sucção crítica, capaz de fazer com que a água presente nos poros maiores comece a sair; teor de umidade volumétrico residual (θ_r), definido como o limite inferior a partir do qual qualquer aumento na sucção mátrica pouco afeta os valores de umidade; teor de umidade saturado (θ_s), esse parâmetro apresenta o mesmo valor da porosidade (n), já que o teor de umidade volumétrico é equivalente ao produto da porosidade e do grau de saturação ($\theta = n \times S$); e capacidade de retenção específica ($C(\Psi)$), obtida a partir da tangente à curva característica e varia com o nível de sucção (GERSCOVICH, 2001).

Embora as características das curvas de diversos solos possam ser generalizadas, conforme mostra a Figura 4, a forma da curva depende fundamentalmente da história de tensões à qual a amostra foi submetida (MARINHO e PEREIRA, 1998).

Ainda em relação à Figura 4, pode-se verificar que o solo argiloso apresenta um maior teor de água, ou seja, uma maior capacidade de retenção de água, em relação ao solo arenoso, para um mesmo valor de sucção.

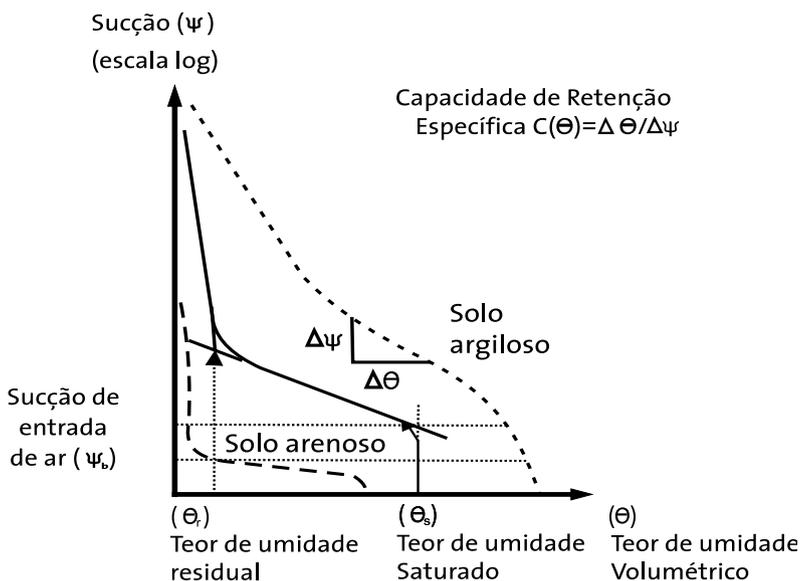


FIGURA 4: Curvas características de solo arenoso e solo argiloso (GERSCOVICH, 2001).

Existe também uma diferença entre as curvas de retenção de um mesmo solo no estado compactado e no estado fofo, conforme pode ser observado na Figura 5. O teor de umidade saturado do material compactado é menor que no material agregado porque a compactação reduz a porosidade do material, portanto, reduz o volume de água necessário para preencher todos os vazios. Entretanto, para teores de umidade intermediários, o material compactado apresenta valores de sucção maiores que o material agregado.

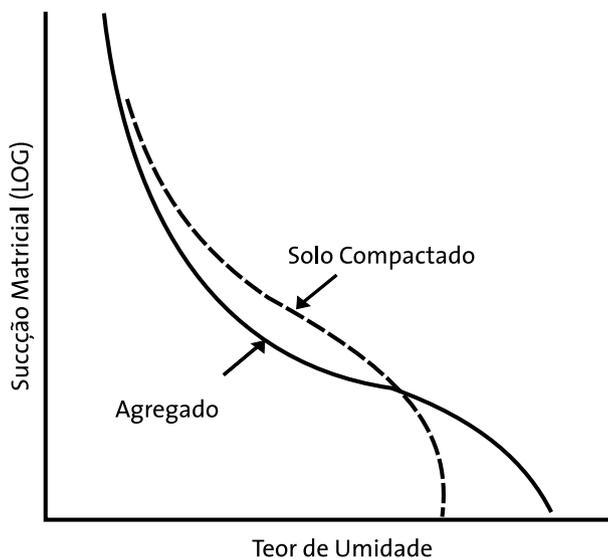


FIGURA 5: Curvas características de dois solos com estruturas diferentes (HILLEL, 1971).

4.4.1 | HISTERESE

A histerese é o fenômeno que diferencia as curvas de retenção obtidas pelo procedimento de “umedecimento” da amostra daquelas obtidas pelo procedimento de “secagem” da amostra.

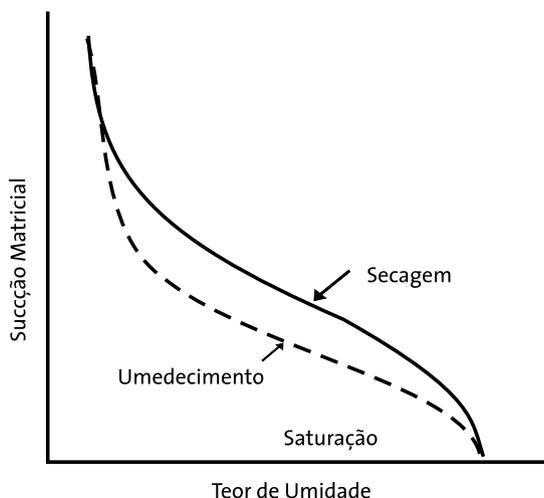


FIGURA 6: Curvas características por umedecimento e secagem (HILLEL, 1971).

De acordo com a Figura 6, verifica-se que o solo apresenta teores de umidade maiores durante o processo de secagem, para atingir as sucções desejadas. A histerese produzida pelos processos de secagem e umedecimento pode ser atribuída à não uniformidade dos vazios, às bolhas de ar capturadas nos vazios do solo durante o umedecimento e à alteração na estrutura do solo decorrente da expansão ou contração do solo (CALLE, 2000).

Segundo Rojas (2002), o valor real da sucção depende não somente do grau de saturação, mas também do estado inicial do solo e de todo o histórico de umedecimento e secagem até aquele momento.

4.4.2 | RELAÇÕES EMPÍRICAS PARA DEFINIR A CURVA CARACTERÍSTICA SOLO-ÁGUA

Alguns estudos têm demonstrado que existe uma relação entre a forma da curva característica e as propriedades dos solos não saturados.

Gerscovich (2001) realizou um estudo da aplicabilidade de proposições empíricas para a modelagem da curva característica para o

caso de dois solos residuais brasileiros. Neste estudo foram analisadas 14 proposições (GARDNER, 1958; BROOKS e COREY, 1964; VISER, 1966; FARREL e LARSON, 1972; ROGER e HORNBERGER, 1978; VAN GENUCHTEN, 1980; GHOSH, 1980; WILLIAMS *et al.*, 1983; SAXTON *et al.*, 1986; HAVERKAMP e PARLAGE, 1986; MCKEE e BUMB, 1987; RAWLS e BRAKENSIEK, 1989; FREDLUND e XING, 1994; AUBERTIN *et al.*, 1998), sendo que, algumas modelavam a função que relaciona sucção com umidade e outras obtinham a curva característica a partir das frações granulométricas. A referida autora adotou uma metodologia para medir a qualidade da modelagem baseada no critério de erro (ε), definido como o somatório do quadrado das diferenças entre o teor de umidade volumétrico calculado (θ_i) e o medido (θ_i^*), dividido pelo número de determinações consideradas (n), conforme apresentado na equação (11).

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta_i^*)^2 \quad (11)$$

Segundo Gerscovich (2001), as proposições empíricas que conseguirem obter um valor de erro (ε) menor que quatro apresentam um bom ajuste com os dados experimentais. Em relação aos dois solos residuais estudados pela referida autora, a melhor proposição foi de Gardner (1958), seguida das proposições de Haverkamp e Parlange (1986), Van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994). Gerscovich e Sayão (2002) avaliaram as quatro melhores proposições, segundo o estudo de Gerscovich (2001), para modelagem da curva característica. Para esse estudo foram utilizados 11 diferentes tipos de solos do Brasil e foi adotado o mesmo critério de erro mencionado anteriormente. Como resultado deste estudo, apenas a proposição de Haverkamp e Parlange (1986) não apresentou um bom ajuste para todos os tipos de solos estudados.

4.5 | Condutividade hidráulica não saturada

Tendo-se em vista que, nos solos em condição não saturada, os poros são ocupados por ar e água, a condutividade hidráulica sofrerá redução como consequência dos três fatores descritos abaixo (MATEUS, 1994):

- ▶ A seção disponível ao fluxo de água sofre redução;
- ▶ Os raios dos poros diminuem com o acréscimo de sucção; reduzindo a permeabilidade e a velocidade do fluxo;
- ▶ A quantidade de poros ocupados pelo ar aumenta, provocando uma descontinuidade na fase líquida, fazendo com que o fluxo de água seja possível através da fase vapor.

Conclui-se, então, que a condutividade hidráulica não saturada varia em função do teor de umidade do solo. Sabendo-se que este parâmetro modifica o potencial matricial do solo, observa-se uma forte interdependência entre condutividade hidráulica não saturada, teor de umidade e sucção.

4.5.1 | OBTENÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NÃO SATURADA

ATRAVÉS DE CORRELAÇÕES

Diversas relações empíricas, associando a condutividade hidráulica não saturada ao grau de saturação, aparecem na literatura.

Gerscovich e Guedes (2004) avaliaram 10 proposições empíricas para a modelagem das relações entre condutividade hidráulica e curva característica (GARDNER, 1958; BROOKS e COREY, 1968; ARBHABHIRAMA e KRIDAKORN, 1968; DAVIDSON *et al.*, 1969; CAMPBELL, 1974; MUALEM, 1976; MUALEM e DAGAN, 1978; VAN GENUCHTEN, 1980; LEONG e RAHARDJO, 1998; VANAPALLI e LOBBEZOO, 2002) e os resultados mostraram que, dentre os modelos avaliados, o de Brooks e Corey (1968) e Arbhahhirama e Kridakorn (1968) forneceram os melhores ajustes para os dois solos estudados.

5 | EVAPORAÇÃO

Segundo Pinto *et al.* (1976), evaporação é definida como o conjunto dos fenômenos da natureza que transformam em vapor a água da superfície do solo, dos cursos de água, lagos, reservatórios de acumulação e mares. Perda por evaporação é a quantidade de água evaporada por unidade de área durante certo intervalo de tempo.

O conceito de evaporação pode ser dividido em evaporação potencial e evaporação real. Segundo *The International Glossary of Hydrology*, a evaporação potencial é definida como “a quantidade de vapor d’água que poderia ser emitida por uma superfície de água livre por unidade de área da superfície e por unidade de tempo sob condições atmosféricas” (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1947, citado em WILSON *et al.*, 1997). O conceito de evaporação real refere-se à evaporação da água existente no solo por unidade de área e por unidade de tempo.

A evaporação real das superfícies de solo, com ou sem vegetação, é considerada como sendo aproximadamente igual à evaporação de uma superfície de água livre (PENMAN, 1948, citado em WILSON *et al.*, 1997). A consideração acima é válida para solos saturados ou próximos da saturação. No entanto, ela torna-se inadequada quando o solo começa a sofrer evaporação. Portanto, métodos tradicionais, tais como o método de Penman, que prevêem a evaporação de superfícies de solos saturados, conduzem a uma superestimativa da evaporação na superfície de solos não saturados.

Existem dois processos principais que governam o fluxo de água entre a superfície do solo e a atmosfera: a água que entra na superfície do solo como líquido, através do processo de infiltração; e a água que sai da superfície do solo como vapor, através do processo de evaporação. O processo de infiltração depende principalmente das propriedades do solo, como a condutividade hidráulica. Já o processo de evaporação é mais difícil de ser avaliado, pois depende tanto das propriedades do solo quanto das condições climáticas.

A Figura 7 mostra uma relação típica para a razão de evaporação real pela evaporação potencial (ER/EP) versus água disponível na superfície da areia. A evaporação real é igual à evaporação potencial ($er/ep = 100\%$) quando a areia está na sua capacidade de campo ou pouco abaixo deste valor. A razão de evaporação (ER/EP) diminui quando a superfície da areia começa a secar, chegando a um valor residual quando a água disponível na areia chega ao valor de ponto de murcha das plantas.

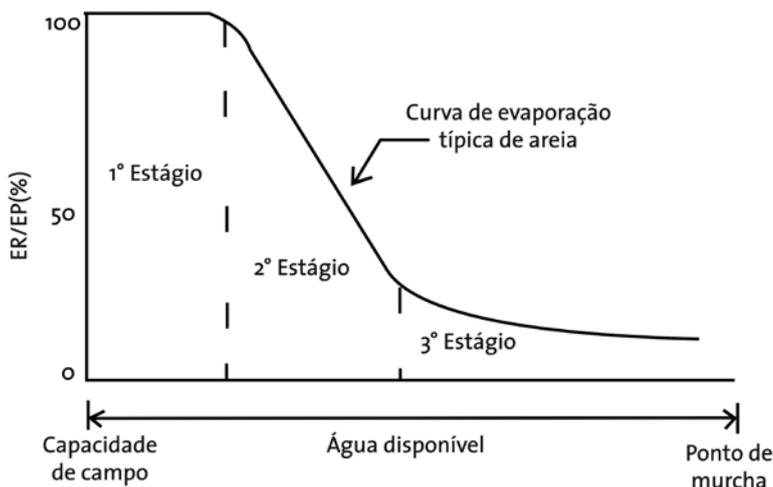


FIGURA 7: Estágios da evaporação (WILSON *et al.*, 1994).

O conceito de ponto de murcha das plantas foi definido por Briggs e Shantz (1912), citado em Kiehl (1979), como sendo a percentagem de água que um solo encerra quando as plantas que nele crescem adquirem um estado de murchamento permanente, não voltando à turgidez mesmo quando colocadas em ambiente saturado de umidade. A capacidade de campo foi definida por Veihmeyer e Hendrikso (1934) citado em Kiehl (1979), como sendo a quantidade de água retida pelo solo previamente saturado, após haver cessado o movimento da água gravitacional e o movimento capilar descendente tornar-se praticamente nulo.

Outro ponto importante que está destacado na Figura 7 são os três estágios de evaporação da água no solo. O 1º estágio é o potencial máximo de secagem que ocorre quando o solo está saturado ou bem próximo da saturação. Esse potencial é determinado pelas condições climáticas. O 2º estágio começa quando as propriedades do solo não permitem um fluxo de água suficiente para a camada de superfície, para manter o potencial máximo de evaporação. A razão de evaporação continua a declinar durante o 2º estágio até um baixo valor residual definido como 3º estágio de secagem. O 3º estágio começa a ocorrer após a superfície do solo se tornar suficientemente seca, causando assim descontinuidade da fase líquida da água. O fluxo de água líquida da superfície cessa e as moléculas de água só podem migrar para a superfície através do processo de difusão de vapor d'água (WILSON *et al.*, 1994).

Wilson *et al.* (1994) realizaram um ensaio de secagem em colunas de areia a fim de medir as taxas de evaporação real e compará-las com os valores previstos pela simulação do programa SOILCOVER, que avalia fluxo evaporativo em solos saturado e não saturado.

O referido ensaio foi realizado em colunas de PVC, com 16,9 cm de diâmetro externo e 30 cm de altura, seladas na base. Duas colunas foram preenchidas com areia (média a fina) saturada, e uma coluna foi preenchida com água pura. O ensaio foi realizado em uma sala com temperatura constante de 38°C e umidade relativa do ar de aproximadamente 10%, durante um período de 42 dias. As colunas de areia tiveram as paredes laterais cobertas por um material isolante para minimizar os efeitos do fluxo de calor lateral. O peso destas colunas foi monitorado durante todo o ensaio através de balanças, e os dados foram armazenados em um computador, que fazia a aquisição de dados em intervalos de 15 minutos. Ao longo do perfil das colunas foram instalados aparelhos de medida de temperatura, cujos dados também eram armazenados em intervalos de 15 minutos. A evaporação das colunas foi calculada com base na variação do seu peso. A razão de evaporação potencial encontrada neste ensaio foi de 8mm/dia. Durante o ensaio foram retiradas amostras de solo para obten-

ção de medida direta de teor de umidade do material ao longo do perfil da coluna.

Valores de evaporação real, perfil de teor de umidade e perfil de temperatura computados pelo programa SOILCOVER foram comparados, por Wilson *et al.* (1994), àqueles obtidos nos ensaios de secagem das colunas de areia. Os referidos autores encontraram uma boa concordância entre os resultados medidos e calculados. Fazendo uma análise de sensibilidade do programa em relação à condutividade hidráulica, Wilson *et al.* (1994) verificaram uma mudança significativa em relação à razão de evaporação do solo quando alterava-se a condutividade hidráulica saturada. Ressalta-se que uma das propriedades do solo que tem maior importância sobre a capacidade de retenção de umidade no solo é a condutividade hidráulica saturada, por controlar o fluxo de água líquida no perfil de solo.

6 | PROGRAMA SOILCOVER

O SOILCOVER é um programa computacional unidimensional usado na simulação do movimento de água de um sistema cobertura/rejeito, o qual está sujeito à infiltração e evapotranspiração na superfície do solo.

Prever o fluxo de água entre a superfície do solo e a atmosfera é uma questão crítica nos projetos de coberturas de aterros de resíduos geradores de acidez. O fluxo de umidade entre o solo e a atmosfera é um processo complexo em que três fatores são dominantes. O primeiro fator diz respeito às condições climáticas: precipitação, radiação, umidade relativa do ar máxima e mínima, temperatura do ar máxima e mínima e velocidade do vento. O segundo está relacionado às propriedades do solo: condutividade hidráulica, curva característica do solo, porosidade, densidade real dos grãos, condutividade térmica e calor específico. O último trata da influência da vegetação, tais como: profundidade das raízes, índice de área foliar, valores de capacidade de campo e ponto de murcha (GEO-ANALYSIS, 2000).

O desenvolvimento de um modelo computacional que avalia fluxo evaporativo em solos requer um sistema de equações que descrevem fluxo de vapor d'água, água líquida e calor.

A evaporação potencial pode ser calculada pela equação de Dalton (WILSON *et al.*, 1994), como apresentada pela equação (12). O uso aparentemente simples desta expressão pode ser considerado uma aproximação direta no cálculo da evaporação potencial. No entanto, a aplicação desta equação em problemas de campo pode ser difícil, devido à avaliação da função $f(u)$, que requer uma aproximação empírica ou a aplicação de um método rigoroso de perfil aerodinâmico.

$$E_0 = f(u)(e_s - e_a) \quad (12)$$

Onde:

E_0 = evaporação potencial (mm/dia);

e_s = pressão de vapor na superfície da água (mmHg ou KPa);

e_a = pressão de vapor do ar acima da superfície da água (mmHg ou KPa);

$f(u)$ = função de fluxo turbulento que depende das características do ar acima da superfície evaporativa.

O método de Penman é um método extremamente utilizado no estudo de evaporação, e tem sua base na equação de Dalton (WILSON *et al.*, 1994). O método de Penman admite que a superfície esteja saturada durante todo o tempo, fornecendo uma boa estimativa da evaporação potencial. Penman (1948), citado em Borma e Karam Filho (2004), também fornece um método relativamente simples para determinar a função $f(u)$ com base na velocidade do vento. A equação (13) apresenta o método de Penman.

$$E_0 = \left(\frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \right) \quad (13)$$

Onde:

E_0 = evaporação potencial (mm/dia);

Δ = declividade da curva de pressão de vapor d'água versus temperatura média (mmHg/°C);

R_n = radiação líquida sobre a superfície de água livre (mm/dia de água);

γ = constante psicrométrica;

$E_a = f(u)$ (es - ea);

$f(u)$ = função empírica de velocidade do vento;

e_s = pressão de vapor na superfície evaporativa;

e_a = pressão de vapor no ar acima da superfície.

Wilson (1990) desenvolveu um método para calcular a evaporação em solos não saturados baseado na equação de Penman. A equação (14) apresenta a equação de Penman modificada por Wilson (1990).

$$E = \left(\frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma A} \right) \quad (14)$$

Onde:

E = fluxo de evaporação real;

Δ = declividade da curva de pressão de vapor d'água *versus* temperatura média do ar (mmHg/°C);

Rn = energia líquida de radiação disponível na superfície do solo (mm/dia de água);

γ = constante psicrométrica;

$E_a = f(u)$ Pa (B - A);

$f(u) = 0,35 (1 + 0,15 Wa)$;

W_a = velocidade do vento (Km/h);

P_a = pressão de vapor do ar acima da superfície de evaporação (mmHg);

B = inverso da umidade relativa do ar (=1/ha);

A = inverso da umidade relativa da superfície do solo (=1/hs).

Quando a umidade relativa na superfície de um solo saturado (hs) for igual a 100%, "A" será igual a 1. Portanto, a formulação de Penman modificada por Wilson (1990) reduz a equação de Penman convencional quando a superfície do solo se encontra saturada. Sendo a umidade relativa do solo dada pela expressão (15) (WILSON, 1990).

$$h_s = e^{\frac{\psi g w_v}{RT}} \quad (15)$$

Onde:

Ψ = potencial de água líquida expresso como potencial mátrico equivalente (m);

T = temperatura do solo (K);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

W_v = peso molecular da água (0,018 Kg/mol);

R = constante universal dos gases (8,314 J/mol K).

O movimento de água líquida no solo pode ser descrito pela Lei de Darcy e o movimento do vapor d'água no solo pode ser descrito pela Lei de Fick. As Leis de Darcy e Fick estão representadas pelas equações (16) e (17), respectivamente (WILSON *et al.*, 1994).

$$q_l = -K_w \left(\frac{\partial h_w}{\partial y} \right) \quad (16)$$

$$q_v = -D_v \left(\frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \quad (17)$$

Onde:

q_l = fluxo vertical de água que atravessa uma unidade de área da secção transversal por unidade de tempo (m/s);

k_w = condutividade hidráulica do solo (m/s);

h_w = carga hidráulica da água (m);

q_v = fluxo de vapor d'água (Kg/m².s);

D_v = coeficiente de difusão do vapor d'água através do solo (Kg.m/KN.s);

P_v = pressão parcial devido ao vapor d'água (KPa).

Fredlund e Morgenstern (1976) apresentam uma relação constitutiva para a variação de volume de água em um elemento de solo submetido a um carregamento. Esta relação é apresentada na equação (18).

$$\frac{\Delta V_w}{V} = \frac{m_1^w d}{m_1^w d} (\sigma_y - u_a) + \frac{m_2^w d}{m_2^w d} (u_a - u_w) \quad (18)$$

Onde:

$\Delta V_w / V$ = variação no teor de umidade volumétrico;

σ_y = tensão vertical (KPa);

u_a = pressão da fase ar (KPa);

u_w = pressão da fase água (KPa);

m_1^w = coeficiente de variação de volume de água devido à variação da tensão vertical;

m_2^w = coeficiente de variação de volume de água devido à variação da sucção mátrica ($\Psi_m = u_a - u_w$).

Somando as equações (16) e (17) e diferenciando em relação a y , obtém-se o divergente do fluxo (variação do teor de umidade volumétrico em relação ao tempo) no espaço unidimensional, devido aos gradientes hidráulicos e de pressão de vapor impostos. Esta relação pode ser igualada à diferencial obtida em relação ao tempo, dada pela equação (18). Admitindo-se que a variação na tensão vertical

(σ_y) e a pressão do ar (u_a) são iguais a zero; a pressão da água $u_w = y_w g(h-y)$; rearranjando e simplificando, obtém-se a equação relativa ao processo de transferência de massa dentro do solo, desenvolvida por Wilson (1990), representada na equação (19).

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} = C_w \frac{\partial [K_w (\frac{\partial h_w}{\partial y})]}{\partial y} + C_v \frac{\partial [D_v (\frac{\partial P_v}{\partial y})]}{\partial y} \quad (19)$$

Onde:

h_w = carga hidráulica total (m);

t = tempo (s),

C_w = coeficiente de adensamento com relação à fase de água líquida, equação (20);

ρ_w = peso específico da água (Kg/m³);

g = aceleração da gravidade (9,81 m/s²);

m_2^w = inclinação da curva de retenção de umidade (1/KPa);

y = posição (m);

K_w = condutividade hidráulica como uma função da sucção mátrica (m/s);

C_v = módulo de variação de volume com relação à fase vapor, equação (21);

P = pressão total de gás na fase ar (KPa);

P_v = pressão de vapor de água em meio poroso não saturado (KPa);

D_v = coeficiente de difusão do vapor d'água através do solo (Kg.m/KN.s).

$$C_w = \frac{1}{\rho_w g m_2^w} \quad (20)$$

$$C_v = \left[\frac{1}{(\rho_w)^2 g m_2^w} \right] \left[\frac{P + P_v}{P} \right] \quad (21)$$

A equação (19) tem duas variáveis, a carga hidráulica (hw) e a pressão de vapor (Pv), que não são independentes entre si. A pressão de vapor (Pv) pode ser relacionada à carga de pressão na fase água ($u_w = \rho_w g(h-y)$) através do uso da relação de Edlefsen e Anderson

(1943) citado em Wilson *et al.* (1994). A equação (22) representa a equação de transferência de vapor d'água.

$$P_v = P_{sv} h_r \quad (22)$$

Onde:

P_v = pressão de vapor no solo,

P_{sv} = pressão de saturação no solo a uma temperatura T,

h_r = umidade relativa do solo como uma função da sucção total e da temperatura, equação (15).

O cálculo da pressão de vapor (P_v) da equação (22) depende da pressão de saturação de vapor e da temperatura do solo. Dessa forma, o perfil da temperatura no solo pode ser avaliado simultaneamente com as equações (19) e (22). Wilson (1990) usa a equação (23) para descrever o fluxo de calor.

$$C_h \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial [\lambda (\frac{\partial T}{\partial y})]}{\partial y} - L_v \left(\frac{P + P_{sv}}{P} \right) \frac{\partial [D_v (\frac{\partial P_v}{\partial y})]}{\partial y} \quad (23)$$

Onde:

T = temperatura (°C);

t = tempo (s)

C_h = calor específico volumétrico (J / m³ °C) => $C_h = C_v \rho_s$;

C_v = calor específico do solo (J/Kg °C);

ρ_s = densidade do solo (Kg/m³);

λ = condutividade térmica (W/m °C);

L_v = calor latente de vaporização (J/Kg).

P = pressão total de gás na fase ar (KPa);

P_v = pressão de vapor de água em meio poroso não saturado (KPa);

D_v = coeficiente de difusão do vapor d'água através do solo (Kg.m / KN.s).

As equações (19), (22) e (23) descrevem a transferência de água líquida, vapor e calor, respectivamente, em um meio poroso. O programa SOILCOVER calcula a evaporação do solo resolvendo as equações (14), (19), (22) e (23) simultaneamente.

O programa computacional SOILCOVER é considerado o estado da arte, em termos de modelagem, para prever o desempenho de um sistema de cobertura de resíduos geradores de acidez, em particular para regiões de climas áridos e semi-áridos onde a evapotranspiração tem grande relevância no desempenho da cobertura (NEWMAN *et al.*, 2001).

Os principais dados de entrada do modelo podem ser divididos em três categorias:

- i) Dados relacionados à malha de elementos finitos das camadas que compõem o sistema cobertura/rejeito,
- ii) Dados de caracterização de cada camada do sistema e,
- iii) Dados climáticos aos quais o sistema fica exposto.

O programa permite simular também condições de uso de vegetação, ocorrência de gelo e degelo e difusão do oxigênio. No entanto, esses itens não serão abordados no presente trabalho.

Para determinação da “malha” unidimensional do sistema cobertura/rejeito, são necessários os seguintes parâmetros: espessura, teor de umidade e temperatura inicial e final de cada camada e valores de espaçamento máximo e mínimo entre nós da malha a ser gerada.

As propriedades dos materiais, requeridas pelo programa são: densidade real dos grãos, porosidade, permeabilidade saturada, coeficiente de variação volumétrica, dados de curva característica, dados de permeabilidade não saturada versus sucção, dados de condutividade térmica versus teor de umidade gravimétrico e dados de calor específico volumétrico versus teor de umidade gravimétrico.

Em relação às três últimas propriedades do solo (permeabilidade não saturada, condutividade térmica e calor específico volumétrico), o SOILCOVER permite duas opções: ou o usuário fornece seus próprios dados ou o programa gera estes dados a partir dos parâmetros do solo e de equações empíricas usadas pelo programa.

Em relação à permeabilidade não saturada, o programa gera a curva de permeabilidade não saturada versus sucção, por meio da equação de Fredlund *et al.* (1994), que necessita dos dados da curva característica e do valor da permeabilidade saturada.

Para o caso da condutividade térmica, o programa trabalha com o método de Johansen (1975) descrito em Geo-Analysis (2000), onde é necessário que o usuário especifique apenas o valor da percentagem de quartzo existente no solo. Geo-Analysis (2000) sugere alguns valores de percentagem de quartzo para alguns tipos de solo.

Em relação ao calor específico volumétrico, definido como a quantidade de calor necessária para variar a temperatura de um metro cúbico de solo em 1°C , o programa trabalha com o método de Vries (1963) descrito em Geo-Analysis (2000). Esse método requer que o usuário forneça o valor de calor específico do solo (J/KgC) para que o programa gere os dados de calor específico volumétrico versus teor de umidade gravimétrico. Geo-Analysis (2000) também sugere valores de calor específico para determinados tipos de solo.

Para o ajuste das curvas de retenção solo-água, o programa utiliza a equação de Fredlund e Xing (1994). Sendo que o teor de umidade da curva de retenção pode ser expresso em termos de volume, peso ou grau de saturação.

Para entrada dos dados climáticos diários, o programa apresenta alternativa para entrar com dados de condições climáticas detalhadas ou simplificadas. A condição climática detalhada consiste da temperatura do ar máxima e mínima, umidade relativa do ar máxima e mínima, velocidade do vento e radiação solar. A condição simplificada requer a temperatura do ar máxima e mínima, a umidade relativa do ar máxima e mínima e a evaporação potencial (normalmente determinada pela panela de evaporação). Como condição de contorno para as duas alternativas, o modelo requer dados diários de fluxo de água na base e na superfície do sistema. Para especificar o fluxo de água na superfície entra-se com valores de precipitação e o fluxo da base do sistema pode ser especificado através de valores de teor de umidade ou pressão. Uma opção para especificar a altura do nível d'água é configurar o sistema de malhas de forma que, na altura do nível d'água, seja especificado o valor de pressão zero na base. Com isto, admite-se que abaixo daquela camada o material encontra-se na condição saturada.

7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A drenagem ácida é um dos problemas ambientais enfrentados pela indústria da mineração e várias alternativas têm sido estudadas para o seu controle. As reações que descrevem o processo de geração de drenagem ácida, nas pilhas de estéreis e rejeitos piritosos da mineração, são conhecidas e mostram que os principais agentes deste processo são o oxigênio e a água.

Uma das soluções que têm sido estudadas (NICHOLSON *et al.*, 1989; WOYSHNER e YANFUL, 1995; WILSON *et al.*, 1995; SIMMS e YANFUL, 1999) é o recobrimento destas pilhas com um sistema de cobertura seca baseado no conceito de barreira capilar. A configuração da barreira capilar (Figuras 1 e 2) tira proveito do funcionamento hidrológico de camadas de solos com contraste de condutividade hidráulica não saturada, para aumentar a retenção de água na cobertura, minimizando a passagem de oxigênio e diminuindo a infiltração da água para a pilha de resíduos, reduzindo, assim, a ação dos principais agentes do processo da DAM.

O dimensionamento deste tipo de cobertura é geralmente realizado com base no balanço hídrico, onde uma maior atenção deve ser dada ao fluxo evaporativo do solo, por se tratar de um processo difícil de quantificar, que depende tanto das propriedades do solo quanto das condições climáticas. A propriedade do solo que mais influencia no processo de evaporação é a condutividade hidráulica não saturada, que está diretamente relacionada à sucção do solo e à condutividade hidráulica saturada.

Um programa computacional que vem sendo bastante utilizado no estudo do fluxo de água no sistema cobertura/rejeito, sujeito à infiltração e evapotranspiração, é o programa unidimensional SOILCOVER (WILSON *et al.*, 1995; SIMMS e YANFUL, 1999; WELS *et al.* 2001). A formulação teórica deste modelo para a evaporação da superfície em relação à atmosfera baseia-se na equação de Dalton. As Leis de Darcy e Fick governam os fluxos de água líquida e vapor d'água, respectivamente. Os resultados obtidos por este modelo mostraram uma boa correlação com os dados experimentais de um ensaio de coluna de evaporação realizado por Wilson *et al.* (1994).

8 | BIBLIOGRAFIA

- ARBHABHIRAMA, A.; KRIDAKOM (1968), "Steady Downward flow to a water". Water Resources Res., Vol 4.
- ASTM D 5298- 03, "Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper", 6p.
- AUBERTIN, M.; RICARD, J. F.; CHAPUIS, R. P. (1998), "A predictive model for the water retention curve: applicaton to tailings from hard-rock mines". Can. Geot. J. 35: 55-69.
- AUBERIN, M.; MOLSON, J.; BUSSIERE, B.; *et al* (2006) "Investigations of layered cover systems acting as oxygen barriers to limit acid mine drainage". 5th ICEG Environmental Geotechnics - Cardiff University 26-30th June - Vol. 2 - pp 827-835
- BARBOSA, J. P., SOARES, P. S. M., BORMA, L. S., *et al.* (2001) "Projeto conceitual para recuperação ambiental da bacia carbonífera sul catarinense". Relatório Técnico elaborado pelo CETEM - Vol I.
- BORMA, L. S., MENDONÇA, R. M. G., SOUZA, V. P. (2002), "Processo de mitigação da formação de drenagens ácidas utilizando coberturas secas". Relatório Técnico elaborado pelo CETEM.
- BORMA, L.S., KARAM FILHO, J. (2004), "Aspectos teóricos da modelagem do balanço hídrico no sistema solo-planta-atmosfera". 5º Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados – São Carlos – Brasil, 217-222.
- BRIGGS, L. J.; SHANTZ, H. L. (1912), "The wilting coefficient for different plants and its indirect determintion". U. S. Depy. Agr. Bur. of Plant Industry. Bul. 230.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. (1964), "Hydraulics properties of porous media". Colorado State Univ. Hydrol. Paper n.3.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. (1968), "Properties of porous media affecting fluid flow". J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng., 92, 61-66.
- CALLE, J. A. C. (2000), "Análise de ruptura de talude em solo não saturado" - Tese de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- CAMPBELL, G. S. (1974), "A simple method for determining unsaturatd conductivity from moisture retention data". Soil Science 117, 311-314.

- CHANDLER, R. J.; GUTIERREZ, C. I. (1986) "The filter-paper method of suction measurement". *Geotechnique* 36, pp 265-268.
- CHANDLER, R. L.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. (1992), "A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings". *Proc. of the Institution of Civil Engineering*, 82-89.
- DAVIDSON, J. M.; STONE, L. R.; NIELSEN, D.R. *et al.* (1969), "Field measurement and use of soil water propriets". *Water Resources Research*, no.5 pp 1312-1321.
- EDLEFSEN, N. E.; ANDERSON, A. B. C. (1943), "Thermodynamics of soil moisture". *Hilgardia*, 15(2): 31-298.
- EPA (1994), "Acid mine drainage prediction". December
- FARREL, D. A.; LARSON, W. E. (1972), "Modelling the pore structure of porous media". *Can,Geot. J.* 31(4) 00 521-532.
- FAWCETT, R. G., COLLIS-GEORGE, N. (1967), "A filter-paper method for determining the moisture characteristics of soil". *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, n.7 – pp. 162-167.
- FEUERHARMEL, C., GEHLING, W.Y.Y., BICA, A. V.D., *et al.* (2004), "Determinação das curvas características de solos coluvionares pelo uso combinado da placa de sucção e método do papel filtro". 5º Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados – São Carlos – Brasil, 243-248.
- FREDLUND, D. G., RAHARDJO, H. (1993), "Soil mechanics for unsaturated soils" – John Wiley & Sons, New York, 517.
- FREDLUND, D. G., XING, A. (1994), "Equations for the soil-water characteristic curve" *Can. Geotech. J.* 31 pp 521-532.
- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. (1976), "Constitutive relations for volume change in unsaturated soils". *Can. Geot. J.*, 13: 261-276.
- GARDNER, W. R. (1958), "Some steady-state of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from water table". *Soil Sci.*, v.130, No 1.2, pp.60-63.
- GEO-ANALYSIS (2000), "SOILCOVER User's manual", Unsaturated Soils Group, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.

- GERSCOVICH, D. M. S. (2001), "Equações para modelagem da curva característica aplicadas a solos brasileiros". 4º Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados - Porto Alegre – Brasil, 76-91.
- GERSCOVICH, D. M. S., GUEDES, M. N. (2004), "Avaliação das relações de condutividade hidráulica em solos brasileiros não saturados". 5º Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados – São Carlos – Brasil, 249-254.
- GERSCOVICH, D. M. S., SAYÃO, A. S. F. J. (2002), "Evaluation of the soil-water characteristic curve equations for soil form Brazil". *Unsaturated Soils - Recife – Brasil, Vol 1, 295-300.*
- GHOSH, R. K. (1980), "Estimation of soil moisture characteristics from mechanical properties of soils". *Soil Sci.*, V.130, no.12, pp.60-63.
- HAMBLIM, A. P. (1981), "Filter paper method for routine measurement of field water potencial". *J. Hydrlogy*, 53 – pp. 355-360.
- HAVERKAMP, R. D. G.; PARLANGE, J.Y. (1986), "Predcting the water-retention curve from particle size distribution: 1. sandy soils without organic matter". *Soil Sci.*, Vol. 142, no.6, 00.325-339.
- HILLEL, D. (1971), "Soil and Water – Physical principles and processes". Academic Press, 288p.
- JUCÁ, J. F. T. (1990), "Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada" – Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- KIEHL, E. J. (1979), "Manual de edafologia – Relações solo planta". Editora Agronômica Ceres, 262 p.
- LEE, H.C., WRAY, W.K. (1995), "Techniques to evaluate soil suction – A vital unsaturated soil water variable". *Unsaturated Soils, Vol. 2, 615- 622.*
- LEONG, E. C.; RAHARDJO, H. (1998), "Review of soil-water charact. curve Eq.". *J. Geot. and Geoenv. Eng.*, dez., pp1106-1117.
- MARINHO, F. A. M. (1994-a), "Medição de succção com o método do papel filtro". X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Vol. 2, pp. 515-522.
- MARINHO, F. A. M. (1994-b), "Shrinkage behavior of some plastic soils". PhD thesis Imperial College - University of London.

- MARINHO, F. A. M. (1997), "Medição de sucção em solos". 3º Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados, Rio de Janeiro, RJ, Vol. 2, pp373-397.
- MARINHO, F. A. M., PEREIRA, J. H. F. (1998), "Mini-curso: Solos não saturados". XI Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica – Brasília – Brasil.
- MATEUS, M. S. C. (1994), "Determinação em laboratório da condutividade hidráulica de solos não saturados" - Tese de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 170 p.
- MCKEE, C. R.; BUMB, A. C. (1987), "Flow-testing coal bed methane production wells in the presence of water and gas". SPE Formation Evaluation 599-608.
- MEND 2.20.1 (1994), "Evaluation of alternative dry covers for the inhibition of acid mine drainage from tailings". March.
- MUALEN, Y. (1976) "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media". Water Resources Research Vol. 12 N°3 pp 513-522.
- MUALEN, Y.; DAGAN, G. (1978), "Hydraulic conductivity of soils: unified approach to the statistical models". Soil Sci. Soc. Am. J., 42, 392-395.
- NEWMAN, G., LOUDON, S., WELS, C. (2001) "Modeling of Alternative Cover Scenarios for Mine Rock Piles at the Zortman and Landusky Mine Sites". National Association of Abandoned Mine Lands Annual Conference, Athens, Ohio, 1-18pp
- NICHOLSON, R. V., GILLHAM, R. W., CHERRY, J. A., *et al.* (1989), "Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers"- Can. Geotech. J. 26 pp 1-8.
- PENMAN, H. L. (1948), "Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass". Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1993: 120-145.
- PINTO, N. L. S., HOLTZ, A. C. T., MARTINS, J. A. *et al.* (1976) "Hidrologia Básica". Editora Edgard Blucher Ltda. - 278 p.
- RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, (1989), "Estimation of soil water retention and hydraulic properties". Unsaturated flow in hydrologic modeling: theory and practice: 275-300. Kluwer Academic Publishers.

- REICHARDT, K. (1987), "A água em sistemas agrícolas" – Editora Manole.
- ROGER, B. C., HERNBERGER, G. M. (1978) – "Empirical equations for some soil hydraulic properties". *Water Res. Res.*, 14, pp.601-604.
- ROJAS, E. (2002), "Modeling the soil-water characteristic curve during wetting and drying cycles" - III International Conference on Unsaturated Soils, Vol. 1 - Recife – Brazil, 215- 219.
- SAXTON, K. E.; RAWLS, J. S.; HOMBERGER; PAPENDICK, (1986), "Estimating generalizec soil-water characteristics from texture". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50, 1031-1036.
- SCOTT, R. F., WESLEY, A. (1965) "Principles of soil mechanics" Publishing Company.
- SHACKELFORD, C. D. (1997), "Modeling and Analysis in environmental geotechnics: Am overview of practical applications". Second International Congress on Enviromental Geotechnics, V.3, pp. 1375-1404, Osaka, Japan, 5-8, Nov.
- SIMMS, P.H., YANFUL, E. K. (1999) "Some insights into the performance of an experimental soil cover near London, Ontario". *Can. Geotech. J.* 36, 846-860.
- SOUZA, V.P., BORMA, L. S., MENDONÇA, R. M.G. (2003), "Projeto de coberturas secas para controle da drenagem ácida em depósitos geradores de acidez". Seminário Brasil – Canadá de Recuperação Ambiental de áreas Mineradas, Florianópolis, SC.
- SWARBRICK, G. E. (1995) "Measurement of soil suction the filter paper method". *Unsaturated Soils*, Vol 2, 653 – 658.
- VAN GENUCHTEN, M. TH. (1980), "A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
- VANAPALLI, S. K.; LOBBEZZO, J. P. (2002), "A normalized function for predicting the coefficient of permeability of unsaturated soils". *UNSAT 2002*, 839-844.
- VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. (1934), "The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils". *Soil Sci.* 32: 181-183,
- VISSER, W. C. (1966), "Progress in the knowledge about the effect of soil moiture content on plant production". *Inst. Land Water Manegement, Tech. Bull.*

- VRIES, D. A. (1963), "Thermal properties of soils". Physics of Plant Environmet, W. R. Van Wilk (ed.). North Holland Pub. Co. pp. 382.
- WELS, C., O'KANE, M., FORTIN, S., *et al.* (2001) "Infiltration Test Plot Study for Mine Rock Piles at Questa Mine, New Mexico". 18th Annual National Meeting, American Society for Surface Mining and Reclamation, Albuquerque, New Mexico.
- WILLIAMS, J.; PREBBLE, R. E.; WILLIAMS, W. T. *et al.* (1983), "The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic curve". Australian Journal of Soil Research 21: 15-32.
- WILSON, G. W. (1990), "The avaluation of evaporative fluxes from unsaturated soil surfaces". Ph.D. thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon.
- WILSON, G. W., BARBOUR, S.L., SWANSON, D., *et al.* (1995) "Instrumentation and modeling for saturated/unsaturated performance of soil covers for acid generating waste rock". Hydrogéologie, n°4 pp 99-108.
- WILSON, G. W., FREDLUND, D.G., BARBOUR, S.L. (1997) "The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces". Can. Geotech. J. 34 pp 145 - 155.
- WILSON, G. W.; FREDLUND, D.G.; BARBOUR, S.L. (1994) "Coupled soil-atmosphere modeling for soil evaporation". Can. Geotech. J. 31 pp 151 - 161.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (1947), Internacional glossary of hydrology. wmo Report No. 385.
- WOYSHNER, M. R., YANFUL, E.K. (1995) "Modelling and field measurements of water percolation through an experimental soil cover on mine tailings". Can. Geotech. J. 32, 601- 609.
- YANFUL, E. K. (1993), "Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic mine tailings". Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No 8, August.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2006, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, cerca de 200 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visitemos em www.cetem.gov.br/series.

ÚLTIMOS NÚMEROS DA SÉRIE GESTÃO E PLANEJAMENTO AMBIENTAL

SGPA-03 - Controle de documentos e da legislação pertinente às organizações na implantação/operação de SGA. Roberto de Barros Emery trindade, Josimar Ribeiro de Almeida e Gustavo Araújo, 2005.

SGPA-02 - Seleção de indicadores de estado e avaliação de sensibilidade dos sistemas naturais às ações antrópicas Gustavo Araujo, Lais Alencar de Aguiar, Josimar Ribeiro de Almeida, Paulo Sérgio Moreira Soares e Roberto de Barros Emery Trindade, 2005.

SGPA-01 - Sistema de Gestão Integrada em Pequenas e Médias Empresas do Setor Mineiro-Metalúrgico Cleber José Cunha Dutra, Paulo Sérgio Moreira Soares e Mário Valente Possa, 2005.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ

Tel.Geral: (21) 3867-7222 - Biblioteca: (21) 3865-7218 ou 3865-7233

Telefax: (21) 2260-2837

E-mail: biblioteca@cetem.gov.br

Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOSSAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.