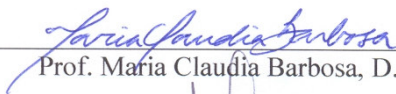



USO DE CINZAS DE CARVÃO NA COMPOSIÇÃO DE UMA COBERTURA DE
REJEITOS DE MINERAÇÃO

Mariluce de Oliveira Ubaldo

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA EM
ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:


Prof. Maria Cláudia Barbosa, D.Sc.


Prof. Laura De Simone Borma, D.Sc.


Prof. Marcos Massao Futai, D.Sc.


Dr. Vicente Paulo de Souza, D.Sc.


Prof. Márcio Almeida Soares de Souza, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO DE 2005

UBALDO, MARILUCE DE OLIVEIRA

Uso de cinzas de carvão na composição de
uma cobertura de rejeitos de mineração [Rio de
Janeiro] 2005

XX, 150 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Geotecnia Ambiental, 2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Cinza de carvão mineral
2. Coberturas de rejeitos piritosos

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Mário Lúcio e
à memória da minha mãe
Maria Luzia

AGRADECIMENTOS

A DEUS acima de tudo.

Ao meu pai Mário Lúcio pelo amor, carinho, dedicação e incentivo em todas as etapas da minha vida.

As minhas orientadoras Laura e Maria Claudia pelo apoio e orientação da presente pesquisa. Aos demais professores da geotecnia que contribuíram com os seus ensinamentos.

Ao Márcio Almeida, Marcos Massao e Vicente Paulo, por terem aceitado o meu convite de fazer parte desta banca examinadora.

Aos meus familiares e amigos que sempre me incentivaram e acreditaram no meu trabalho. Ao meu namorado Marcos pela paciência e dedicação nos momentos difíceis.

Aos funcionários do laboratório, Carlos, Marcos, Maria da Glória, Mauro, Neide e Sergio, pela amizade e apoio durante a realização dos ensaios.

Aos amigos Alex, Ana, Beatriz, Carlos, Juliana, Leonardo, Marcelo, Maurício, Ricardo, Roberta, Rodrigo e Rosane, pelo convívio neste período.

Aos doutorandos Anderson, Antônio, Cíntia, Deize, Marcela, Maria do Socorro, Nicole, Roberto e Tatiana, pelo carinho e disponibilidade em ajudar.

À amiga Rose Mary pelas colaborações na pesquisa, sugestões e críticas enriquecedoras, e amizade formada neste período.

Ao CETEM pela realização de alguns ensaios e apoio durante toda a pesquisa. A Carbonífera Criciúma-SC e a Usina Termelétrica Jorge Lacerda-SC que forneceram os materiais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Silvio Tavares que viabilizou os ensaios de curva característica realizados na Embrapa-RJ, e à PUC-RIO na pessoa da Prof. Maria Isabel pela realização de algumas análises de absorção atômica.

À CAPES pelo suporte financeiro.

Ao tio Antônio pela valiosa contribuição na revisão ortográfica e gramatical deste trabalho e a Fernanda que ajudou na formatação desta dissertação.

A todos, os meus sinceros agradecimentos.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

USO DE CINZAS DE CARVÃO NA COMPOSIÇÃO DE UMA COBERTURA DE
REJEITOS DE MINERAÇÃO

Mariluce de Oliveira Ubaldo

Maio/2005

Orientadoras: Maria Claudia Barbosa
Laura de Simone Borma

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho estuda o uso de cinzas provenientes da queima do carvão mineral como um material alternativo para compor um sistema de cobertura seca para cobrir pilhas de rejeitos geradores de acidez. Este sistema de cobertura é baseado no princípio de funcionamento da barreira capilar, que consiste da sobreposição de um material de textura fina sobre um material granular. A proposta é verificar a viabilidade da cinza de fundo e da cinza volante como camada de material granular. Os resultados mostraram que a cinza de fundo apresentou-se viável. A cinza de fundo apresenta características físicas e comportamento hidráulico de material granular, é classificado como Resíduo Classe II A – Não Inerte. Os resultados das simulações com o programa SOILCOVER mostraram um bom desempenho da barreira capilar com o uso da cinza de fundo.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

USE OF COAL ASHES COMPOSITION OF MINE WASTE COVER SYSTEM

Mariluce de Oliveira Ubaldo

May/2005

Advisors: Maria Claudia Barbosa

Laura de Simone Borma.

Department: Civil Engineering

The use of thermoelectric coal ashes as an alternative material in dry covers of acid generating mining waste piles is studied. This cover system is based in capillary barrier principles, consisting on the superposition of a fine texture material on the top a granular material layer. The proposal is to verify the adequacy of using the bottom and fly coal ashes as the granular layer of the cover. The results showed that the bottom ashes can be used with a satisfactory behavior. The bottom ashes present physical characteristic and hydraulic behavior consistent with a granular material, is classified as a non-inert waste. The SOILCOVER simulation performed showed a god performance of the capillary barrier using the bottom coal ashes .

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | I |
| 1.1) RELEVÂNCIA DO ESTUDO | 1 |
| 1.2) OBJETIVO..... | 3 |
| 1.3) DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS | 4 |
| | |
| CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| 2.1) DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS..... | 6 |
| 2.2) COBERTURAS SECAS | 7 |
| 2.3) SOLOS NÃO SATURADOS | 12 |
| 2.3.1) <i>As Fases do Solo</i> | 12 |
| 2.3.2) <i>Potencial Total da Água no Solo (P_t)</i> | 15 |
| 2.3.2.1) Potencial Gravitacional (P_g)..... | 15 |
| 2.3.2.2) Potencial de Pressão (P_p)..... | 16 |
| 2.3.2.3) Potencial Osmótico (P_{os}) | 16 |
| 2.3.2.4) Potencial Matricial ou Mátrico (P_m) | 16 |
| 2.3.3) <i>Sucção</i> | 17 |
| 2.3.3.1) Medição da Sucção no Solo | 18 |
| 2.3.4) <i>Curva Característica Solo-água</i> | 20 |
| 2.3.4.1) Histerese | 22 |
| 2.3.4.2) Relações Empíricas para Definir a Curva Característica Solo-Água | 23 |
| 2.3.5) <i>Condutividade Hidráulica Não Saturada</i> | 25 |
| 2.3.5.1) Obtenção da Condutividade Hidráulica Não Saturada Através de Correlações..... | 26 |
| 2.4) EVAPORAÇÃO | 27 |
| 2.5) DETERMINAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO EM SOLOS NÃO SATURADOS – O PROGRAMA SOILCOVER..... | 30 |
| 2.6) COMENTÁRIOS FINAIS | 36 |
| | |
| CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS | 38 |
| 3.1) MATERIAIS | 38 |

| | |
|---|----|
| 3.2) MÉTODOS | 38 |
| 3.2.1) <i>Ensaio de Caracterização</i> | 39 |
| 3.2.1.1) Densidade Real dos Grãos | 39 |
| 3.2.1.2) Limites de Atterberg | 39 |
| 3.2.1.3) Análise Granulométrica | 40 |
| 3.2.2) <i>Ensaio de Compactação</i> | 40 |
| 3.2.3) <i>Compacidade da areia</i> | 40 |
| 3.2.4) <i>Ensaio de Adensamento</i> | 41 |
| 3.2.5) <i>Condutividade Hidráulica Saturada</i> | 41 |
| 3.2.6) <i>Curva Característica</i> | 42 |
| 3.2.7) <i>Ensaio Químicos</i> | 45 |
| 3.2.7.1) Composição Química..... | 45 |
| 3.2.7.2) Teor de Matéria Orgânica e Valor de pH..... | 46 |
| 3.2.7.3) Teor de Enxofre | 46 |
| 3.2.7.4) Capacidade Tampão..... | 46 |
| 3.2.7.5) Balanço Ácido-Base | 47 |
| 3.2.7.6) Lixiviação..... | 47 |
| 3.2.7.7) Solubilização | 48 |
| 3.2.8) <i>Ensaio Mineralógico</i> | 49 |

CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 50

| | |
|---|----|
| 4.1) INTRODUÇÃO | 50 |
| 4.2) CINZA DE FUNDO E CINZA VOLANTE | 50 |
| 4.2.1) <i>Densidade Real dos Grãos</i> | 50 |
| 4.2.2) <i>Limites de Atterberg</i> | 52 |
| 4.2.3) <i>Análise Granulométrica</i> | 52 |
| 4.2.4) <i>Ensaio de Compactação</i> | 54 |
| 4.2.5) <i>Ensaio de Adensamento</i> | 57 |
| 4.2.6) <i>Condutividade Hidráulica Saturada</i> | 59 |
| 4.2.7) <i>Curva Característica</i> | 60 |
| 4.2.8) <i>Permeabilidade não saturada</i> | 63 |
| 4.2.9) <i>Composição Química</i> | 65 |
| 4.2.10) <i>Teor de Matéria Orgânica e valor do pH</i> | 67 |

| | |
|---|------------|
| 4.2.11) Teor de Enxofre | 67 |
| 4.2.12) Capacidade Tampão | 68 |
| 4.2.13) Balanço Ácido-Base..... | 69 |
| 4.2.14) Lixiviação..... | 70 |
| 4.2.15) Solubilização..... | 71 |
| 4.2.16) Difração de Raios X | 72 |
| 4.2.17) Comentários finais..... | 74 |
| 4.3) ARGILA E AREIA | 74 |
| 4.3.1) Densidade Real dos Grãos..... | 74 |
| 4.3.2) Limites de Atteberg..... | 75 |
| 4.3.3) Análise Granulométrica..... | 75 |
| 4.3.4) Ensaio de Compactação | 76 |
| 4.3.5) Compacidade da areia..... | 77 |
| 4.3.6) Ensaio de Adensamento..... | 78 |
| 4.3.7) Permeabilidade saturada..... | 79 |
| 4.3.8) Curva Característica | 79 |
| 4.3.9) Permeabilidade Não Saturada..... | 81 |
| 4.4 – COMENTÁRIOS FINAIS | 82 |
| | |
| CAPÍTULO 5 – ENSAIOS DE EVAPORAÇÃO | 85 |
| 5.1) INTRODUÇÃO | 85 |
| 5.2) DESCRIÇÃO E RESULTADOS DOS ENSAIOS | 86 |
| 5.3) COMENTÁRIOS FINAIS..... | 106 |
| | |
| CAPÍTULO 6 – SIMULAÇÕES DO SOILCOVER | 107 |
| 6.1) INTRODUÇÃO | 107 |
| 6.2) DADOS DE ENTRADA DO MODELO..... | 107 |
| 6.3) SIMULAÇÃO DO ENSAIO DE EVAPORAÇÃO..... | 109 |
| 6.4) SIMULAÇÕES DE CAMPO | 114 |
| 6.5) COMENTÁRIOS FINAIS | 128 |
| | |
| CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS | 129 |

| | |
|---|------------|
| 7.1) CONCLUSÕES | 129 |
| 7.2) SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS | 132 |
| CAPÍTULO 8 – BIBLIOGRAFIA | 133 |
| ANEXO | 144 |

ÍNDICE DE FIGURA

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

| | |
|---|----|
| Figura 2-1 – Esquema de uma barreira capilar simples. | 10 |
| Figura 2-2 – Esquema de barreira capilar dupla. | 10 |
| Figura 2-3 – Diagrama de fases de um solo não saturado, (a) diagrama simplificado de três fases; (b) diagrama completo de quatro fases (FREDLUND e RAHARDJO, 1993)..... | 13 |
| Figura 2-4 – Curvas características de solo arenoso e solo argiloso (GERSCOVICH, 2001)..... | 21 |
| Figura 2-5 – Curva característica de dois solos com estruturas diferentes (HILLEL, 1971)..... | 22 |
| Figura 2-6 – Curvas características por umedecimento e secagem (HILLEL, 1971)..... | 22 |
| Figura 2-7 – Estágios da evaporação (WILSON <i>et al.</i> , 1994)..... | 28 |

Capítulo 3 – Materiais e Métodos

| | |
|---|----|
| Figura 3-1 – Técnica do papel-filtro, (a) amostra compactada e com a umidade desejada; (b) amostra após a colocação dos dois papéis-filtro (colocados um de cada lado, em contato direto com a amostra) e envolta duas vezes no papel filme. | 44 |
|---|----|

Capítulo 4 – Apresentação e Discussão dos Resultados

| | |
|--|----|
| Figura 4-1 – Curva granulométrica da cinza de fundo..... | 52 |
| Figura 4-2 – Curva granulométrica da cinza volante. | 53 |
| Figura 4-3 – Curva de compactação da cinza de fundo. | 55 |
| Figura 4-4 – Curva de compactação da cinza volante..... | 55 |
| Figura 4-5 – Curvas de compactação de cinzas de carvão (NISHIKAWA <i>et al.</i> , 2002)..... | 56 |
| Figura 4-6 – Curva de compactação de cinza de fundo proveniente da usina termelétrica de Charqueadas (HEINECK, 2000). | 56 |
| Figura 4-7 – Ensaio de adensamento da cinza de fundo. | 57 |
| Figura 4-8- Ensaio de adensamento da cinza volante. | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 4-9- Curvas características da cinza de fundo. | 62 |
| Figura 4-10 – Curvas características da cinza volante. | 62 |
| Figura 4-11– Curvas de permeabilidade não saturada <i>versus</i> sucção mátrica calculada pelo programa SOILCOVER para cinza de fundo. | 65 |
| Figura 4-12– Curvas de permeabilidade não saturada <i>versus</i> sucção mátrica calculada pelo programa SOILCOVER para cinza volante. | 65 |
| Figura 4-13 – Ensaio de capacidade tampão da cinza de fundo. | 68 |
| Figura 4-14 – Ensaio de capacidade tampão da cinza volante. | 69 |
| Figura 4-15 – Difratoograma de raios X da cinza de fundo. | 73 |
| Figura 4-16– Difratoograma de raios X da cinza volante. | 73 |
| Figura 4-17 – Curva granulométrica da argila Picollo. | 75 |
| Figura 4-18 – Curva granulométrica da areia. | 76 |
| Figura 4-19 – Curva de compactação da argila. | 77 |
| Figura 4-20 – Curva de adensamento referente à argila. | 78 |
| Figura 4-21 – Curva característica da argila. | 80 |
| Figura 4-22 – Curvas características da areia. | 80 |
| Figura 4-23 – Curvas de permeabilidade não saturada <i>versus</i> sucção mátrica calculada pelo programa SOILCOVER para argila. | 81 |
| Figura 4-24 – Curvas de permeabilidade não saturada <i>versus</i> sucção mátrica calculada pelo programa SOILCOVER para areia. | 82 |
| Figura 4-25 – Curvas de permeabilidade não saturada para cinza de fundo, argila Picollo e areia. | 82 |
| Figura 4-26– Curvas de retenção solo-água para a cinza de fundo, argila Picollo e areia. | 83 |

Capítulo 5 –Ensaio de Evaporação

| | |
|--|----|
| Figura 5-1 – Aparelho utilizado para medir temperatura e umidade relativa do ar máxima e mínima. | 85 |
| Figura 5-2 – Dimensões das colunas e propriedades geotécnicas dos materiais utilizados na 1ª série dos ensaios de evaporação. | 86 |
| Figura 5-3 – Foto das colunas da primeira etapa dos ensaios de evaporação. | 87 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5-4 – Ensaio de evaporação – Série 1: (a) relação de massa de água evaporada acumulada (g) <i>versus</i> tempo (dia) ; (b) relação de massa de água evaporada acumulado pela massa de água inicial <i>versus</i> tempo (dia). | 89 |
| Figura 5-5 – Ensaio de evaporação – Série 1: (a) evaporação (mm/dia) <i>versus</i> tempo (dia) e (b) relação de evaporação real pela evaporação potencial <i>versus</i> tempo (dia)..... | 91 |
| Figura 5-6 – Condições ambientais de laboratório – Série 1: (a) temperatura do ar (°C) <i>versus</i> tempo (dia) e (b) umidade relativa do ar (%) <i>versus</i> tempo (dia). | 93 |
| Figura 5-7 – Valores de grau de saturação ao longo da profundidade das colunas de barreira capilar dupla da primeira série dos ensaios de evaporação..... | 94 |
| Figura 5-8 – Dimensões das colunas e propriedades geotécnicas dos materiais utilizados na 2ª série dos ensaios de evaporação. | 96 |
| Figura 5-9 – Ensaio de evaporação – Série 2: (a) relação de massa de água evaporada acumulada (g) <i>versus</i> tempo (dia); (b) relação de massa de água evaporada acumulada pela massa de água inicial <i>versus</i> tempo (dia)..... | 97 |
| Figura 5-10 – Ensaio de evaporação – Série 3: (a) evaporação (mm/dia) <i>versus</i> tempo (dia) e (b) relação de evaporação real pela evaporação potencial <i>versus</i> tempo (dia)..... | 98 |
| Figura 5-11 – Condições ambientais de laboratório – Série 2: (a) temperatura do ar (°C) <i>versus</i> tempo (dia) e (b) umidade relativa do ar (%) <i>versus</i> tempo (dia). | 99 |
| Figura 5-12 – Valores de grau de saturação ao longo da profundidade das colunas de barreira capilar dupla da segunda série dos ensaios de evaporação. | 100 |
| Figura 5-13 – Dimensões das colunas e propriedades geotécnicas dos materiais utilizados na 3ª série dos ensaios de evaporação..... | 102 |
| Figura 5-14 – Ensaio de evaporação – Série 3: (a) relação de massa de água evaporada acumulada (g) <i>versus</i> tempo (dia); (b) relação de massa de água evaporada acumulado pela massa de água inicial <i>versus</i> tempo (dia). | 103 |
| Figura 5-15 – Ensaio de evaporação – Série 3: (a) evaporação (mm/dia) <i>versus</i> tempo (dia) e (b) relação de evaporação real pela evaporação potencial <i>versus</i> tempo (dia)..... | 104 |
| Figura 5-16 – Condições ambientais de laboratório – Série 3: (a) temperatura do ar (°C) <i>versus</i> tempo (dia) e (b) umidade relativa do ar (%) <i>versus</i> tempo (dia). | 105 |

Capítulo 6 – Simulações do SOILCOVER

| | |
|---|-----|
| Figura 6-1 – Desenho esquemático da simulação do ensaio de evaporação. | 110 |
| Figura 6-2 – Dados das curvas de retenção das amostras de cinza de fundo e argila Picollo. | 111 |
| Figura 6-3 – Dados de laboratório utilizados na simulação, (a) temperatura máxima e mínima (°C), (b) umidade relativa do ar máxima e mínima (%) e (c) evaporação potencial (mm/dia)..... | 112 |
| Figura 6-4 – Comparação entre os resultados obtidos no ensaio de evaporação e na simulação do programa SOILCOVER. | 113 |
| Figura 6-5 – Comparação entre os dados de evaporação real (mm/dia) <i>versus</i> tempo (dia)..... | 113 |
| Figura 6-6 – Desenho esquemático das simulações de campo. | 115 |
| Figura 6-7 – Dados das curvas de retenção dos materiais usados nas simulações de campo..... | 116 |
| Figura 6-8 – Dados climáticos da cidade de Criciúma – SC, referentes ao ano 2000, (a) temperatura do ar máxima e mínima e (b) umidade relativa do ar máxima e mínima. | 117 |
| Figura 6-9 – Dados climáticos da cidade de Criciúma – SC, referentes ao ano 2000, (a) precipitação e (b) evaporação potencial. | 118 |
| Figura 6-10 – Simulação de uma pilha de rejeito sem cobertura, (a) fluxo de água acumulado; (b) perfil do grau de saturação da camada de rejeito..... | 119 |
| Figura 6-11 – Simulação de uma cobertura de 30 cm de argila, (a) fluxo de água acumulado; (b) perfil do grau de saturação da cobertura; (c) perfil do grau de saturação do rejeito..... | 121 |
| Figura 6-12 – Simulação de uma cobertura de 60 cm de argila, (a) fluxo de água acumulado; (b) perfil do grau de saturação da cobertura; (c) perfil do grau de saturação do rejeito..... | 123 |
| Figura 6-13 – Simulação de uma cobertura de barreira capilar usando areia (a) fluxo de água acumulado; (b) perfil do grau de saturação da cobertura; (c) perfil do grau de saturação do rejeito..... | 125 |
| Figura 6-14 - Simulação de uma cobertura de barreira capilar usando cinza de fundo: (a) fluxo de água acumulado; (b) perfil do grau de saturação da cobertura; (c) perfil do grau de saturação da camada de rejeito. | 127 |

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

| | |
|--|----|
| Tabela 2-1 – Classificação das coberturas secas de acordo com o papel que exercem para efeito de inibição da DAM (modificado de BORMA <i>et al.</i> , 2002)..... | 8 |
| Tabela 2-2 – Possíveis componentes em um sistema de cobertura (modificado de SOUZA <i>et al.</i> , 2003)..... | 11 |
| Tabela 2-3 – Técnicas de medida de sucção (modificado de MARINHO e PEREIRA, 1998)..... | 18 |
| Tabela 2-4 – Proposições para modelagem da curva característica (modificado de GERSCOVICH, 2001). | 24 |
| Tabela 2-5 Proposição para modelagem da curva de permeabilidade não saturada (modificado de GERSCOVICH e GUEDES, 2004). | 26 |

Capítulo 3 – Materiais e Métodos

| | |
|---|----|
| Tabela 3-1 – Símbolos referentes a cada material. | 38 |
| Tabela 3-2 – Classificação das areias segundo a compacidade, PINTO (2002). | 41 |

Capítulo 4 – Apresentação e Discussão dos Resultados

| | |
|---|----|
| Tabela 4-1 – Resultados do ensaio de densidade real dos grãos. | 51 |
| Tabela 4-2 – Valores de densidade real dos grãos para algumas cinzas de fundo CHIIES <i>et al.</i> (2003)..... | 51 |
| Tabela 4-3 – Resultados da análise granulométrica..... | 53 |
| Tabela 4-4 Resultados da análise granulométrica realizada por MENDONÇA (2004). | 54 |
| Tabela 4-5 Resultados da análise granulométrica obtidos por CHIES <i>et al.</i> (2003) para amostras de cinza de fundo..... | 54 |
| Tabela 4-6 – Valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima. | 54 |
| Tabela 4-7 – Valores de M_v para cinza de fundo..... | 58 |
| Tabela 4-8 – Valores de M_v para cinza volante..... | 58 |

| | |
|---|----|
| Tabela 4-9 – Coeficientes de condutividade hidráulica saturada das cinzas de fundo e volante..... | 59 |
| Tabela 4-10- Coeficientes de condutividade hidráulica para a cinza de fundo (CHIES et al., 2003). | 59 |
| Tabela 4-11 – Parâmetros empíricos da equação de FREDLUND E XING (1994) e o valor da umidade volumétrica saturada das curvas de cinza de fundo representadas no gráfico 4.7. | 62 |
| Tabela 4-12 – Parâmetros empíricos da equação de FREDLUND e XING (1994) e o valor da umidade volumétrica saturada das curvas de cinza volante representadas no gráfico 4.8. | 63 |
| Tabela 4-13 – Composição química da cinza de fundo e da cinza volante..... | 66 |
| Tabela 4-14 – Concentração (%) dos constituintes maiores nas cinzas de fundo e volante de diferentes procedências (CHIES <i>et al.</i> , 2003). | 67 |
| Tabela 4-15 – Teor de matéria orgânica e valor de pH..... | 67 |
| Tabela 4-16 – Tabela referente aos valores de teor de enxofre. | 68 |
| Tabela 4-17– Valores de PN, PA e PNA para a cinza de fundo e cinza volante..... | 70 |
| Tabela 4-18 – Resultados do ensaio de Lixiviação..... | 71 |
| Tabela 4-19 – Resultados do ensaio de solubilização..... | 72 |
| Tabela 4-20 – Análise granulométrica das amostras de argila e areia. | 76 |
| Tabela 4-21 – Valores de índice de vazios da areia..... | 77 |
| Tabela 4-22 – Valores de M_v referentes à argila..... | 78 |
| Tabela 4-23 – Resultados de Permeabilidade saturada. | 79 |
| Tabela 4-24 – Parâmetros empíricos da equação de FREDLUND e XING (1994) e o valor da umidade volumétrica saturada das curvas características da argila e da areia. | 81 |

Capítulo 5 – Ensaio de Evaporação

| | |
|--|-----|
| Tabela 5-1 – Valores referentes aos apresentados na figura 5.7..... | 94 |
| Tabela 5-2 – Valores referentes aos apresentados na figura 5.12..... | 100 |

Capítulo 6 – Simulações do SOILCOVER

| | |
|---|-----|
| Tabela 6-1 – Propriedades dos materiais usados na simulação do ensaio de evaporação. | 110 |
| Tabela 6-2 – Propriedades dos materiais usados nas simulações de campo. | 116 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------------|--|
| A | - área da seção transversal da amostra |
| a | - parâmetro de ajuste |
| a_v | - coeficiente de compressibilidade |
| b | - parâmetro de ajuste |
| $C(\emptyset)$ | - capacidade de retenção específica |
| C_h | - calor específico volumétrico |
| C_m | - calor específico |
| CR | - compactidade relativa |
| C_v | - calor específico do solo |
| C_w | - coeficiente de adensamento |
| de | - variação linear do índice de vazios |
| D_v | - coeficiente de difusão |
| δ | - variação linear da tensão vertical |
| e | - índice de vazios |
| e_a | - pressão de vapor do ar acima da superfície da água |
| e_s | - pressão de vapor na superfície da água |
| e_{\max} | - índice de vazios máximo |
| e_{\min} | - índice de vazios mínimo |
| e_{nat} | - índice de vazios natural |
| e_o | - índice de vazios inicial |
| EP(E_o) | - Evaporação potencial |
| ER (E) | - Evaporação real |
| f(u) | - função de fluxo turbulento |
| g | - aceleração da gravidade |
| G_s | - densidade real dos grãos |
| h_a | - umidade relativa do ar |
| h_r | - umidade relativa do solo |
| h_s | - umidade relativa da superfície do solo |
| h_w | - carga hidráulica |
| K | - coeficiente de permeabilidade |

| | |
|-----------|---|
| K_{rel} | - coeficiente de permeabilidade relativa |
| K_{sat} | - coeficiente de permeabilidade saturada |
| L_v | - calor latente de evaporação |
| m | - parâmetro de ajuste |
| m_1^w | - coeficiente de variação de volume de água em função da tensão normal |
| m_2^w | - coeficiente de variação de volume de água em função da sucção mátrica |
| M_v | - coeficiente de variação volumétrica |
| n | - número de determinações consideradas |
| n | - parâmetro de ajuste |
| P_g | - Potencial gravitacional da água no solo |
| P_m | - Potencial mátrico da água no solo |
| P_{os} | - Potencial osmótico da água no solo |
| P_p | - Potencial de pressão da água no solo |
| P_{sv} | - pressão de saturação no solo |
| P_t | - Potencial total da água no solo |
| P_v | - pressão parcial devido ao vapor d'água |
| q | - parâmetro de ajuste |
| Q | - vazão |
| Q | - porcentagem de quartzo |
| q_l | - fluxo de água líquida |
| q_v | - fluxo de vapor d'água |
| R | - constante universal dos gases |
| R_n | - radiação líquida |
| R_t | - fator de correção da temperatura |
| S | - grau de saturação |
| T | - temperatura |
| t | - tempo |
| u_a | - pressão do ar |
| u_w | - pressão da água |
| V | - volume |
| w | - teor de umidade gravimétrico |
| w | - teor de umidade gravimétrico inicial |
| w | - umidade do papel-filtro |
| W_a | - velocidade do vento |

| | |
|--------------------|---|
| w_{otm} | - umidade ótima |
| W_v | - peso molecular da água |
| \acute{O} | - parâmetro de ajuste |
| \tilde{Q}_a | - peso específico seco aparente |
| \tilde{Q}_{dmax} | - peso específico seco aparente máximo |
| \tilde{Q}_s | - peso específico seco das partículas sólidas |
| \tilde{Q}_a | - peso específico da água |
| \ddot{A} | - declividade |
| $\ddot{A}t$ | - variação do tempo |
| \acute{O} | - erro |
| \c{C} | - parâmetro de ajuste |
| \c{C} | - porosidade |
| \grave{E} | - teor de umidade normalizad |
| \grave{e} | - teor de umidade volumétrico |
| \grave{e} | - teor de umidade volumétrico calculado |
| \grave{e}^* | - teor de umidade volumétrico medido |
| \grave{e} | - teor de umidade volumétrica residual |
| \grave{e}_s | - teor de umidade volumétrico saturado |
| \grave{e} | - parâmetro de ajuste |
| \tilde{n}_s | - densidade do solo |
| \tilde{n}_w | - densidade da água |
| \acute{O}_y | - tensão vertical |
| \emptyset | - Sucção |
| \emptyset_b | - sucção de entrada de ar |
| \emptyset_m | - Sucção mátrica |
| \emptyset_{os} | - Sucção osmótica |

Capítulo 1 - Introdução

1.1) Relevância do Estudo

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 tem-se 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 destas 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.

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 minimizar 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. A barreira capilar impede a passagem de oxigênio e água para o rejeito de mineração e, ao mesmo tempo, é capaz de manter um elevado grau de saturação no seu interior, mesmo durante o período seco.

Um outro problema da mineração de carvão brasileiro é o excesso de cinza que é produzido durante a queima. Segundo HEINECK *et al.* (2003), o processo de combustão do carvão dá origem a resíduos genericamente chamados de cinzas, que podem apresentar-se sob diversas formas: escória, cinza de fundo e cinza volante. As escórias são produzidas nos processos de combustão em leito fixo e, por isso, as cinzas resultantes apresentam-se normalmente com granulometria grosseira ou em blocos com elevado teor de carbono não queimado (10 a 20%). Já nos processos de combustão do carvão em forma pulverizada, as cinzas resultantes apresentam granulometria mais fina e dividem-se em duas classes: a cinza volante “fly ash” e a cinza de fundo “bottom ash”, que se diferenciam principalmente pelo tamanho das partículas e forma de obtenção. As cinzas volantes são arrastadas pelos gases de combustão das fornalhas e retiradas por um sistema de captação denominado precipitador eletrostático. As cinzas de fundo são coletadas no fundo das fornalhas e transportadas por via aquosa até um tanque de decantação.

Por informação da usina termelétrica Jorge Lacerda, localizada na cidade de Tubarão – SC, no mês de abril de 2004 o consumo de carvão foi de 203.418,5 toneladas, tomando este valor como média mensal, o consumo de carvão desta usina fica em torno de 2.440.000 t/ano. Sabe-se que, em média, 40% do carvão queimado é transformado em cinza, e das cinzas geradas, 30% são cinza de fundo e 70% cinza volante. Com base nestes números, podemos dizer que na usina termelétrica Jorge Lacerda são geradas aproximadamente 293.000 t/ano de cinza de fundo e 683.000 t/ano de cinza volante.

Atualmente, toda a produção de cinza volante da usina Jorge Lacerda está sendo vendida para indústrias, para serem utilizadas na fabricação do cimento, e uma pequena parte da cinza de fundo está sendo utilizada em áreas degradadas pela mineração de carvão. A maior parte da cinza de fundo gerada fica estocada em bacias no próprio pátio da usina, exposta ao tempo. Segundo BORMA *et al.* (2003) em algumas minerações do Rio Grande do Sul, a cinza de fundo e a cinza volante retornam da termelétrica para serem dispostas nas cavas da mina. Ao serem recobertas com material gerador de acidez, comprometem ainda mais a qualidade da água que atravessa os depósitos.

Muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas com a finalidade de reduzir o volume de resíduos a serem dispostos inadequadamente ou sobrecarregando os aterros sanitários existentes. As formas mais utilizadas comumente são: reutilização ou reciclagem dos resíduos, tratamento dos resíduos com potencial de contaminação transformando-os em materiais inertes e redução da geração de resíduos.

1.2) Objetivo

Com a finalidade de utilizar um resíduo que tem sido disposto de maneira inadequada, a presente pesquisa objetiva estudar a viabilidade de utilização da cinza, como um material alternativo na cobertura de depósitos de rejeitos de carvão. Devido ao comportamento de material granular, a cinza seria utilizada em substituição da areia na barreira capilar, provendo o contraste necessário entre as camadas. As cinzas avaliadas no presente estudo são a cinza volante e a cinza de fundo provenientes da usina termelétrica Jorge Lacerda.

Seguindo a mesma linha de pesquisa, sob cobertura de depósitos de resíduos de mineração geradores de acidez, está sendo desenvolvida na COPPE/UFRJ uma tese de doutorado pela aluna Rose Mary Gondim Mendonça. No decorrer deste trabalho serão apresentados alguns resultados de ensaios realizados pela referida aluna, uma vez que foram utilizados os mesmos materiais.

1.3) Descrição dos Capítulos

Esta dissertação é composta de oito capítulos e um anexo. O capítulo dois traz uma breve explicação sobre: a geração da drenagem ácida, os diferentes tipos de cobertura seca e suas finalidades, o comportamento dos solos não saturados, a componente evaporativa do balanço hídrico e o modelo computacional SOILCOVER, usado na simulação do movimento de água de um sistema cobertura/rejeito.

O capítulo três engloba a descrição dos materiais estudados e a metodologia dos ensaios realizados em laboratório que incluem: ensaios de caracterização física (densidade real dos grãos, limites de Atterberg e análise granulométrica), permeabilidade saturada, adensamento, compactação, compacidade da areia, curva característica, análises químicas (composição química, teor de enxofre, valor do pH e teor de matéria orgânica), capacidade tampão, balanço ácido-base, lixiviação, solubilização e análise mineralógica (difração de Raio X).

O capítulo quatro apresenta os resultados e as análises obtidas a partir dos ensaios descritos no capítulo três. Onde são apresentadas dentre outras coisas, a avaliação do potencial de neutralização e de geração de acidez das cinzas estudadas, e a classificação das cinzas segundo as definições da norma NBR 10004/2004 para resíduos sólidos.

O capítulo cinco descreve e apresenta os resultados do ensaio de evaporação em colunas realizados em laboratório. Faz-se, nesse capítulo, um estudo do comportamento de diferentes materiais em relação a componente evaporativa do balanço hídrico, avaliados em colunas com apenas um material e em colunas com três camadas de materiais diferentes.

O capítulo seis apresenta as simulações realizadas utilizando o programa computacional SOILCOVER. Foram realizadas, primeiramente, simulações do ensaio de evaporação descrito no capítulo cinco, com o objetivo de comparar os resultados obtidos do ensaio com os gerados pelo programa. Posteriormente, foram feitas simulações de uma cobertura com dimensões reais e condições climáticas de campo.

O capítulo sete busca concluir os estudos e propor linhas para futuras pesquisas. No capítulo oito constam as referências que serviram como base para esta pesquisa.

O anexo apresenta um estudo de sensibilidade do programa computacional SOILCOVER.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

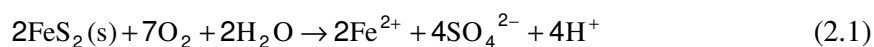
2.1) Drenagem Ácida de Minas

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.

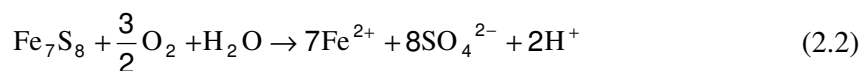
Ocorrendo em depósitos de resíduos de mineração (pilhas de estéril ou rejeitos) ricos em sulfetos de ferro (principalmente pirita) expostos à oxidação, a DAM é a principal responsável pela diminuição do pH das águas que percolam pelo depósito, aumentando o potencial de solubilização dos metais pesados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

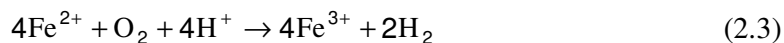
Oxidação da pirita:



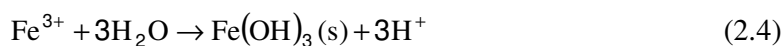
Oxidação da pirrotita:



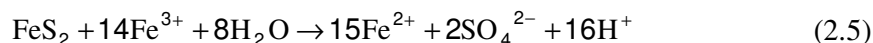
Oxidação do ferro:



Precipitação do ferro:



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



As equações (2.1) e (2.2) 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 (2.3) 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 (2.4), acontece devido ao fato do 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 (2.5), juntamente com a oxidação do ferro, equação (2.3), 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.

2.2) 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, estas 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 2.1 apresenta a classificação das coberturas secas de acordo com o papel que elas exercem para prevenir a DAM.

Tabela 2-1 – Classificação das coberturas secas de acordo com o papel que exercem para efeito de inibição da DAM (modificado de BORMA *et al.*, 2002)

| <i>Classificação</i> | <i>Papel principal na inibição da DAM</i> |
|------------------------------------|---|
| 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 estudo 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

Uma camada de argila compactada funciona como barreira ao fluxo de oxigênio, e também pode atuar como barreira hidráulica, impedindo o fluxo de água para dentro do depósito. Para que a camada de solo argiloso tenha um bom funcionamento como barreira hidráulica, o ideal é que ela 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 2.1).



Figura 2-1 – Esquema de uma barreira capilar simples.

Na condição não saturada, a camada de material fino tende a reter a água no seu interior, devido ao efeito de sucção. A camada granular, por sua vez, apresenta baixa permeabilidade na condição não saturada, devido à presença de ar nos poros do material granular que reduz a interligação dos vazios preenchidos por água. Dessa forma, a água fica impedida de percolar da camada argilosa para a arenosa, em direção ao rejeito.

No entanto, na parte superior da camada argilosa, pode haver a perda de água por evaporação. Para evitar isso, constroem-se uma barreira capilar dupla (figura 2.2). Nesse caso, a camada arenosa superior impede que a água migre por ascensão e seja perdida para a atmosfera por evaporação.

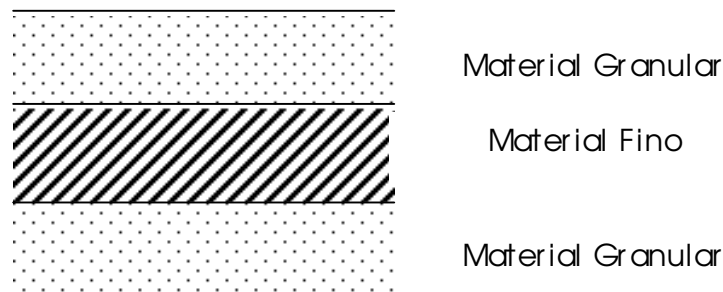


Figura 2-2 – Esquema de barreira capilar dupla.

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 2.2 apresenta os possíveis componentes de um sistema de cobertura, nesses moldes.

É importante ressaltar que a camada de material fino que compõe a barreira capilar tem a finalidade de impedir a passagem de oxigênio e água para o rejeito, para tanto, é necessário que a mesma retenha água em seu interior, mantendo-se sempre com um alto grau de saturação.

Tabela 2-2 – Possíveis componentes em um sistema de cobertura (modificado de SOUZA *et al.*, 2003).

| <i>Camadas</i> | <i>Função</i> | <i>Considerações</i> |
|-----------------------------|---|--|
| Camada superficial | -Prevenir erosão; -Promover evapotranspiração; -Promover o crescimento da vegetação. | Camada indispensável ao sistema de cobertura. |
| Camada de proteção | -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 | -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 | -Reduzir a infiltração de água e oxigênio para o interior do rejeito. | Camada mais importante do sistema de cobertura. |
| Camada de material granular | -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. |

2.3) 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 objetivo de muitas pesquisas.

2.3.1) 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 de membrana contráctil (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

A massa e o volume de cada fase podem ser esquematicamente representados pelo diagrama de fases. A figura 2.3 (a) mostra um diagrama simplificado de três fases, onde podemos observar que a membrana contráctil faz parte da fase água. A figura 2.3 (b) mostra um diagrama mais completo de quatro fases.

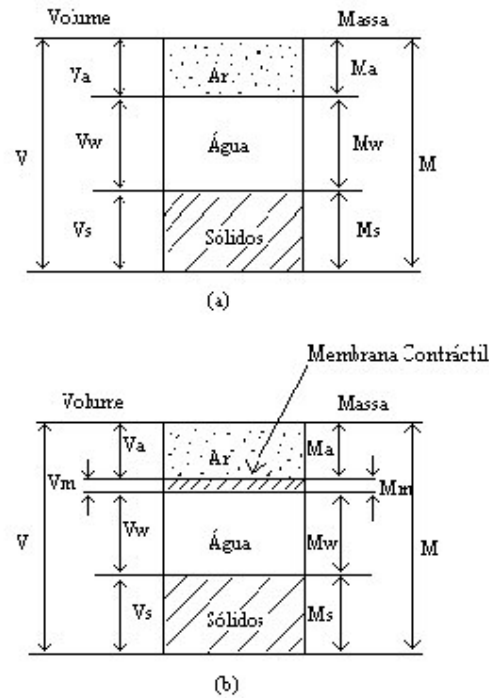


Figura 2-3 – Diagrama de fases de um solo não saturado, (a) diagrama simplificado de três fases; (b) diagrama completo de quatro fases (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

- 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).

2.3.2) 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 (2.6) 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.

$$P_t = P_g + P_{os} + P_p + P_m \quad (2.6)$$

Onde:

P_t = Potencial total;

P_g = Potencial gravitacional;

P_{os} = Potencial osmótico;

P_p = Potencial de pressão;

P_m = Potencial matricial.

2.3.2.1) 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.

2.3.2.2) 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.

2.3.2.3) 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).

2.3.2.4) 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).

2.3.3) 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 este. 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 (2.7), 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.

$$\psi = \psi_m + \psi_{os} \quad (2.7)$$

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 2.8.

$$\psi_m = u_a - u_w \quad (2.8)$$

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.

2.3.3.1) Medição da Sucção no Solo

Existem diversos métodos para determinação da sucção do solo, tanto em campo, quanto em laboratório. A tabela 2.3 apresenta um resumo de algumas técnicas de medidas de sucção do solo (MARINHO e PEREIRA,1998). A seguir serão descritas apenas as duas técnicas de medida de sucção que foram utilizadas neste trabalho.

Tabela 2-3 – Técnicas de medida de sucção (modificado de MARINHO e PEREIRA, 1998).

| <i>Método</i> | <i>Tipo de sucção medida</i> | <i>Faixa de medida (KPa)</i> |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Tensiômetro | Matricial e total | 0 – 90 |
| Aparelho extrator de Richards | 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 |

- **Aparelho Extrator de Richards**

O princípio de medida da sucção mátrica do solo utilizando o extrator de Richards consiste basicamente em colocar uma amostra de solo saturado em placas de cerâmica, submetê-la a uma determinada pressão, esperar a amostra atingir a drenagem máxima da água contida nos poros do solo (correspondente à tensão aplicada) e determinar a umidade da amostra.

- **Método do Papel-filtro**

Este método baseia-se no princípio de que um solo, com determinada umidade, quando é posto em contato com um papel-filtro, com umidade menor, faz com que este último absorva água do solo até que o sistema entre em equilíbrio.

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 seja a mesma, independente da caixa ou lote usado (FAWCETT e COLLIS-GEORGE, 1967 citado em MARINHO, 1997).

A realização do ensaio consiste em se colocar o papel-filtro em contato 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. 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 atmosfera. 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 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, 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 semi-permeável 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.

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) entre 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.

2.3.4) 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 volumétrico (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 de “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 2.4 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), este 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 ($C(\theta)$), 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 2.4, 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 2.4 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.

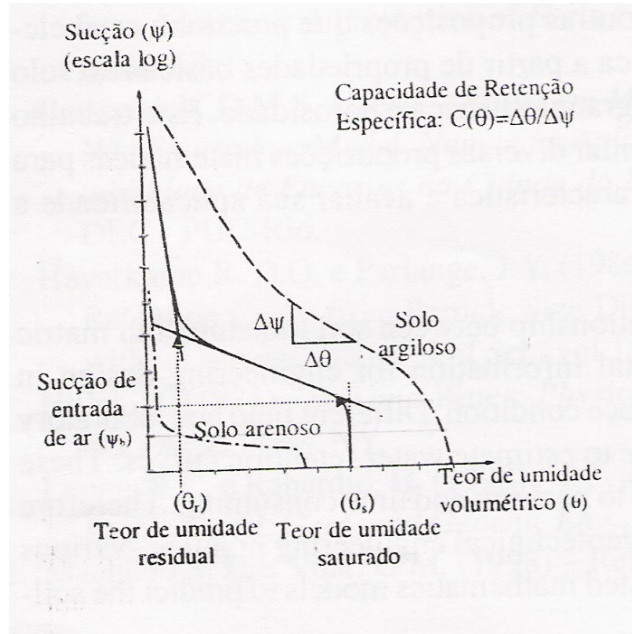


Figura 2-4 – Curvas características de solo arenoso e solo argiloso (GERSCOVICH, 2001).

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 2.5. 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.

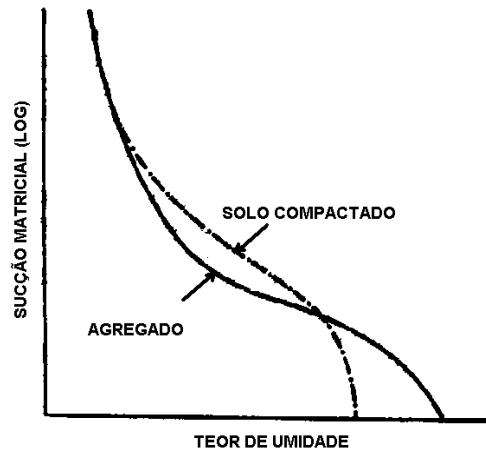


Figura 2-5 – Curva característica de dois solos com estruturas diferentes (HILLEL, 1971).

2.3.4.1) 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 2-6 – Curvas características por umedecimento e secagem (HILLEL, 1971).

De acordo com a figura 2.6, verifica-se que o solo apresenta teores de umidade maiores, durante o processo de secagem, para atingir as sucções desejadas. Pode ser observado também que, tanto para a curva de secagem, quanto para a curva de umedecimento, o

valor de θ_s é o mesmo quando se trabalha com o mesmo solo e este apresenta a mesma estrutura.

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.

2.3.4.2) 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. A tabela 2.4 apresenta algumas das equações que simulam a curva característica, relacionando sucção com umidade.

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; VISSER, 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 ($\bar{\delta}$), definido como o somatório do quadrado das diferenças entre o teor de umidade volumétrico calculado ($\hat{\theta}_i$) e o medido ($\hat{\theta}_i^*$), dividido pelo número de determinações consideradas (n), conforme apresentado na equação (2.9).

Tabela 2-4 – Proposições para modelagem da curva característica (modificado de GERSCOVICH, 2001).

| Referência | Equação | Definição de variáveis |
|--------------------------------|--|--|
| GARDNER (1958) | $\Theta = \frac{1}{1 + q\Psi^n}$ $\Theta = \frac{\theta_s - \theta}{\theta_s - \theta_r}$ | n e q = parâmetros de ajuste \bar{E} = teor de umidade normalizado \bar{e}_s = teor de umidade volumétrica saturado \bar{e} = teor de umidade volumétrica residual \bar{e} = teor de umidade volumétrica $\bar{\phi}$ = sucção |
| BROOKS e COREY (1964) | $\Theta = \left(\frac{\Psi_b}{\Psi} \right)^\lambda$ | \bar{E} = teor de umidade normalizado \bar{e} = parâmetro de ajuste $\bar{\phi}_b$ = sucção de entrada de ar $\bar{\phi}$ = sucção |
| VAN GENUCHTEN (1980) | $\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\Psi)^n} \right]^m$ | \bar{E} = teor de umidade normalizado α, n e m = parâmetros de ajuste $\bar{\phi}$ = sucção |
| WILLIAM <i>et al.</i> , (1993) | $\ln \bar{\phi} = a + b \ln \bar{e}$ | a e b = parâmetros de ajuste $\bar{\phi}$ = sucção \bar{E} = teor de umidade volumétrica |
| HAVERKANMP e PARLANGE (1986) | Curva de umedecimento $\theta = \frac{n}{1 + \lambda} \left(\frac{\Psi_b}{\Psi} \right)^\lambda \dots \Psi > \Psi_b$ $\theta = n \left[1 - \left(\frac{\lambda}{1 + \lambda} \right) \left(\frac{\Psi}{\Psi_b} \right) \right] \dots \Psi_b^* \leq \Psi \leq \Psi_b$ $\theta = \theta_s \dots \Psi \leq \Psi_b^*$ Curva de secagem $\theta = n \left(\frac{\Psi_b}{\Psi} \right)^\lambda \left[1 - \frac{\Psi_b}{\Psi} \left(1 - \frac{\theta_s}{n} \right) \right] \dots \Psi > \Psi_b$ $\theta = \theta_s \dots \Psi \leq \Psi_b$ | n = porosidade \bar{e} = parâmetros de ajuste $\bar{\phi}$ = sucção \bar{e}_s = teor de umidade volumétrica saturado $\bar{\phi}_b^*$ e $\bar{\phi}_b$ = sucção de entrada de ar da curva de umedecimento e secagem, respectivamente. |
| FREDLUND e XING (1994) | $\theta = C_\Psi \left\{ \frac{\theta_s}{\ln \left[e + \left(\frac{\Psi}{a} \right)^n \right]^m} \right\}$ $C_\Psi = 1 - \frac{\ln \left[1 + \left(\frac{\Psi}{\Psi_r} \right) \right]}{\ln \left[1 + \left(\frac{10^6}{\Psi_r} \right) \right]}$ | \bar{e}_s = teor de umidade volumétrica saturado $\bar{\phi}$ = sucção e = 2,718 $\bar{\phi}_o = 10^6$ KPa a, n e m = parâmetros de ajuste $\alpha = \bar{\phi}$ $m = 3,67 \ln \left(\frac{\theta_s}{\theta_i} \right)$ $n = \left[\frac{1,31^{(m+1)}}{m\theta_s} \right] 3,72s\Psi_i$ |

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta_i^*)^2 \quad (2.9)$$

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 este 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.

2.3.5) 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.

2.3.5.1) 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. A tabela 2.5 reúne algumas dessas relações.

Tabela 2-5 Proposição para modelagem da curva de permeabilidade não saturada (modificado de GERSCOVICH e GUEDES, 2004).

| Referência | Equação | Definição de variáveis |
|---------------------------------|--|---|
| GARDNER (1958) | $K = \frac{K_{sat}}{1 + a \left[\frac{\Psi}{(\rho_w g)^n} \right]}$ | Ψ = sucção a e n = parâmetros de ajuste $\tilde{\rho}_w$ = densidade da água g = aceleração da gravidade K_{sat} = permeabilidade saturada |
| BROOKS e COREY (1968) | $K(\Psi) = K_{sat} \left(\frac{\Psi_b}{\Psi} \right)^\eta \rightarrow \Psi > \Psi_b$ $K(\Psi) = K_{sat} \rightarrow \Psi \leq \Psi_b$ | Ψ = sucção Ψ_b = sucção de entrada de ar η = parâmetro de ajuste K_{sat} = permeabilidade saturada |
| ARBHABHIRAMA e KRIDAKORN (1968) | $K = \frac{K_{sat}}{\left(\frac{\Psi}{\Psi_b} \right)^n + 1}$ | Ψ = sucção Ψ_b = sucção de entrada de ar n = parâmetro de ajuste K_{sat} = permeabilidade saturada |
| CAMPBELL (1974) | $K = K_{sat} \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3}$ | θ_s = teor de umidade saturado b = parâmetro de ajuste K_{sat} = permeabilidade saturada |
| VAN GENUCHTEN (1980) | $K(S_e) = K_{sat} S_e \left\{ 1 - \left[1 - S_e^{(1/m)} \right]^m \right\}^2$ $S_e = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)$ | θ_s = teor de umidade saturado θ_r = teor de umidade residual m = parâmetro de ajuste S_e = grau de saturação do solo l = 1,5 K_{sat} = permeabilidade saturada |
| LEONG e RAHARDJO (1998) | $K_{rel} = \Theta^p \rightarrow \Theta = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)$ | $K_{rel} = K / K_{sat}$ Θ = teor de umidade normalizado θ_s = teor de umidade saturado θ_r = teor de umidade residual p = parâmetro de ajuste K_{sat} = permeabilidade saturada |

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 ARBHABHIRAMA e KRIDAKORN (1968) forneceram os melhores ajustes para os dois solos estudados.

2.4) 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 “à 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 2.7 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 a baixo 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.

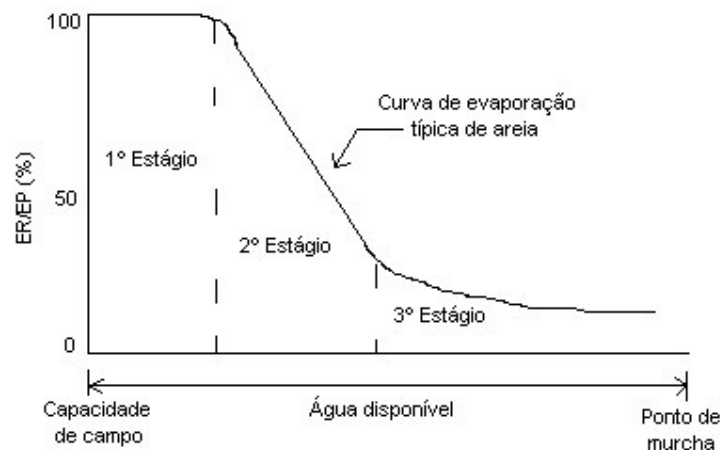


Figura 2-7 – Estágios da evaporação (WILSON *et al.*, 1994).

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 2.7 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. Este 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 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 obtenção 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) verificou 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.

2.5) Determinação do Balanço Hídrico em Solos Não Saturados – O 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 (2.10). 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.

$$E_0 = f(u) (e_s - e_a) \quad (2.10)$$

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 (2.11) apresenta o método de Penman.

$$E_0 = \left(\frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \right) \quad (2.11)$$

Onde:

E_0 = evaporação potencial (mm/dia);

Δ = derivada 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;

$E_a = f(u) (e_s - e_a)$;

$f(u)$ = 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) citado em WILSON *et al.* (1994) desenvolveu um método para calcular a evaporação em solos não saturados baseado na equação de Penman. A equação (2.12) apresenta a equação de Penman modificada por WILSON (1990).

$$E = \left(\frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma A} \right) \quad (2.12)$$

Onde:

E = fluxo de evaporação real;

\ddot{A} = derivada da curva de pressão de vapor d'água *versus* temperatura média do ar (mmHg/°C);

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

$\ddot{\alpha}$ = constante psicrométrica;

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

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

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 ($=1/h_a$);

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

Quando a umidade relativa na superfície de um solo saturado (h_s) 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 (2.13) (WILSON, 1990 citado em BORMA e KARAM FILHO, 2004)

$$h_s = e^{\frac{\Psi_{gw_v}}{RT}} \quad (2.13)$$

Onde:

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

T = temperatura do solo (K);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

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 (2.14) e (2.15) respectivamente (WILSON *et al.*, 1994).

$$q_l = -K_w \left(\frac{\partial h_w}{\partial y} \right) \quad (2.14)$$

$$q_v = -D_v \left(\frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \quad (2.15)$$

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 ($Kg/m^2.s$);

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 (2.16).

$$\frac{\Delta V_w}{V} = m_1^w d(\sigma_y - u_a) + m_2^w d(u_a - u_w) \quad (2.16)$$

Onde:

\dot{V}_w / V = variação no teor de umidade volumétrico;

\dot{C}_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
($\phi_m = u_a - u_w$).

Somando as equações (2.14) e (2.15) e diferenciando em relação à 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 (2.16). Admitindo-se que a variação na tensão vertical (\dot{C}_y) e a pressão do ar (u_a) são iguais a zero; a pressão da água $u_w = \tilde{C}_w g(h-y)$; rearranjando e simplificando, obtém-se a equação relativa ao processo de transferência de massa dentro do solo, desenvolvida por WILSON (1990) citado em WILSON *et al.* (1994), representada na equação (2.17).

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} = C_w \frac{\partial \left[K_w \left(\frac{\partial h_w}{\partial y} \right) \right]}{\partial y} + C_v \frac{\partial \left[D_v \left(\frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \right]}{\partial y} \quad (2.17)$$

Onde:

h_w = carga hidráulica total (m);

t = tempo (s),

C_w = coeficiente de adensamento com relação à fase de água líquida, equação (2.18);

$\tilde{\rho}_w$ = 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); 5

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 (2.19);

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).

$$C_w = \frac{1}{\rho_w g m_2^w} \quad (2.18)$$

$$C_v = \left[\frac{1}{(\rho_w)^2 g m_2^w} \right] \left[\frac{P + P_v}{P} \right] \quad (2.19)$$

A equação (2.17) tem duas variáveis, a carga hidráulica (h_w) e a pressão de vapor (P_v), que não são independentes entre si. A pressão de vapor (P_v) pode ser relacionada à carga de pressão na fase água ($u_w = \tilde{\Gamma}_w g (h-y)$) através do uso da relação de EDLEFSEN e ANDERSON (1943) citado em WILSON *et al.* (1994). A equação (2.20) representa a equação de transferência de vapor d'água.

$$P_v = P_{sv} h_r \quad (2.20)$$

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 (2.13).

O cálculo da pressão de vapor (P_v) da equação (2.20) 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 (2.17) e (2.20). WILSON (1990) citado em WILSON *et al.* (1994) usa a equação (2.21) para descrever o fluxo de calor.

$$C_h \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \left[\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \right]}{\partial y} - L_v \left(\frac{P + P_v}{P} \right) \frac{\partial \left[D_v \left(\frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \right]}{\partial y} \quad (2.21)$$

Onde:

T = temperatura (°C);

t = tempo (s)

C_h = calor específico volumétrico ($J / m^3 \text{ } ^\circ C$) $\Rightarrow C_h = C_v \tilde{\rho}_s$;

C_v = calor específico do solo ($J / Kg \text{ } ^\circ C$);

$\tilde{\rho}_s$ = densidade do solo (Kg / m^3);

\tilde{e} = condutividade térmica ($W / m \text{ } ^\circ C$);

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 (2.17), (2.20) e (2.21) 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 (2.12), (2.17), (2.20) e (2.21) simultaneamente.

2.6) Comentários 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 2.1 e 2.2) 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.

Para as condições climáticas da região próxima à cidade de Criciúma-SC, região com a maior concentração de indústrias mineradoras de carvão do Brasil, a configuração de cobertura mais adequada seria a barreira capilar dupla (figura 2.2) de acordo com o estudo realizado por BORMA *et al.* (2002).

Dois motivos principais objetivaram o estudo da utilização das cinzas de carvão como um material alternativo para compor o sistema de cobertura de barreira capilar. O primeiro motivo é a não utilização de um material arenoso nobre, como a areia, e o segundo é fornecer uma utilidade para este tipo de resíduo. Principalmente para a cinza de fundo, que fica estocada nos pátios das usinas termelétricas formando pilhas de resíduos expostas ao tempo. 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 a 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).

Capítulo 3 – Materiais e Métodos

3.1) Materiais

Trabalhou-se, com quatro tipos de materiais distintos: cinza de fundo, cinza volante, argila e areia. As cinzas são provenientes da queima do carvão mineral da usina termelétrica Jorge Lacerda-SC. A argila da Jazida Picollo e a areia são materiais provenientes de áreas de empréstimo da Carbonífera Criciúma, que fica localizada no município de Forquilha – SC.

Nas amostras de cinzas foram realizados ensaios de caracterização geotécnica, química e mineralógica. Nas amostras de argila e areia foram realizados apenas ensaios de caracterização geotécnica. Os símbolos utilizados que descrevem os materiais estão apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3-1 – Símbolos referentes a cada material.

| Amostra | Símbolo |
|-----------------------|---------|
| Cinza de fundo | CF |
| Cinza volante | CV |
| Argila Jazida Picollo | AP |
| Areia | A |

3.2) Métodos

Para caracterização dos materiais, foram realizados ensaios de densidade real dos grãos, limites de Atterberg e análise granulométrica. No ensaio de compactação foram obtidos os parâmetros de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo, para reproduzir corpos de prova em compactação estática. Através do ensaio de compactação determinou-se o índice de vazios correspondente à densidade relativa da areia

compactada. O ensaio de adensamento foi realizado para determinar o coeficiente de variação volumétrica (M_v), que é um dos dados de entrada do programa SOILCOVER. Os parâmetros de condutividade hidráulica saturada e curva de retenção solo-água também são dados de entrada do modelo SOILCOVER e os ensaios necessários à sua determinação também foram realizados no presente trabalho.

Os ensaios de composição química, teor de matéria orgânica e teor de enxofre foram realizados com o objetivo de caracterizar as amostras de cinza. O ensaio de capacidade tampão foi realizado para avaliar o possível uso das cinzas como uma barreira de inibição da reação de drenagem ácida. Através do balanço ácido-base foi determinada a capacidade das amostras de cinzas de gerar drenagem ácida. Os ensaios de lixiviação e solubilização fornecem os resultados utilizados na classificação das cinzas de acordo com as definições da norma NBR 10004/2004 para resíduos sólidos. A caracterização mineralógica das amostras de cinza foi realizada pelo ensaio de difração de raios-X.

3.2.1) Ensaios de Caracterização

A norma utilizada para a preparação das amostras do ensaio de caracterização foi a NBR 6457/86 – Amostras de Solo - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Para estes ensaios foi realizada a secagem prévia das amostras ao ar.

3.2.1.1) Densidade Real dos Grãos

O Ensaio de densidade real dos grãos foi realizado segundo a norma DNER- ME 093/94 Solos - Determinação da densidade real dos grãos.

3.2.1.2) Limites de Atterberg

Os métodos utilizados para realizar os ensaios de limite de liquidez (\dot{U}_L) e limite de plasticidade (\dot{U}_P) são, respectivamente, aqueles descritos na NBR 6459/84 – Solo -

Determinação do Limite de Liquidez e na NBR 7180/84 – Solo - Determinação do Limite de Plasticidade.

3.2.1.3) Análise Granulométrica

Os ensaios de granulometria (peneiramento e sedimentação) foram realizados segundo os procedimentos descritos na NBR 7181/84 – Solo - Análise granulométrica.

3.2.2) Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação foi realizado na energia Proctor Normal segundo a norma NBR 7182/86 – Solo - Ensaio de Compactação, com o intuito de determinar a umidade ótima de compactação ($w_{ótima}$) e o peso específico seco aparente máximo ($\tilde{\gamma}_{d\text{máx}}$). Os valores de $w_{ótima}$ e $\tilde{\gamma}_{d\text{máx}}$ da curva de compactação foram usados para moldar os corpos de prova com compactação estática para os demais ensaios.

3.2.3) Compacidade da areia

Para determinar a compacidade da areia é necessário analisar o índice de vazios natural da areia (e_{nat}) em confronto com os índices de vazios mínimo (e_{min}) e índice de vazios máximo (e_{max}) em que ela pode se encontrar. A compacidade da areia é então expressa pela compacidade relativa (CR), calculado pela equação (3.1). A tabela 3.2 apresenta uma classificação das areias segundo a compacidade.

$$CR = \frac{e_{max} - e_{nat}}{e_{max} - e_{min}} \quad (3.1)$$

Tabela 3-2 – Classificação das areias segundo a compactidade, PINTO (2002).

| <i>Classificação</i> | <i>CR</i> |
|-----------------------------|--------------------|
| Areia fofa | $CR < 0,33$ |
| Areia de compactidade média | $0,33 < CR < 0,66$ |
| Areia compacta | $CR > 0,66$ |

O índice de vazios máximo foi determinado seguindo os procedimentos do método “A” (utilizando funil) descritos na norma MB-3324/90 – Solo - Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos, e o índice de vazios mínimo foi determinado conforme os procedimentos do método “B.1” descritos na norma MB -3388/91 – Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos.

Para determinar alguns valores de índice de vazios intermediários, entre o índice de vazios máximo e mínimo, adotou-se o mesmo procedimento descrito por OLIVEIRA FILHO (1987), denominado “chuveiro”.

3.2.4) Ensaio de Adensamento

O ensaio de adensamento foi realizado segundo a norma NBR 12007/90 – Solo – Ensaio de adensamento unidimensional. Os corpos de prova foram moldados com compactação estática na própria célula de adensamento. O anel utilizado neste ensaio possuía um diâmetro de 5cm e altura de 1,86cm.

3.2.5) Condutividade Hidráulica Saturada

A condutividade hidráulica saturada foi determinada em ensaios com carga variável e carga constante. Estes ensaios foram realizados segundo o procedimento padrão do laboratório da COPPE/UFRJ para ensaios de Permeabilidade. Para a sua realização, os corpos de prova foram moldados em anéis cilíndricos de dimensões de 10,1cm de diâmetro e 10,1cm de altura, com compactação estática.

3.2.6) Curva Característica

Foram utilizados dois tipos de ensaio para determinar a curva característica solo-água: o ensaio do papel-filtro, realizado no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ e o ensaio de Extrator de Richards, realizado na Embrapa/RJ.

a) Ensaio do Papel-filtro

O objetivo do ensaio do papel-filtro é obter dados de sucção *versus* teor de umidade. A sucção pode ser fornecida em termos de sucção mátrica ou sucção total, como explicado anteriormente no item (2.3.3.1), e o teor de umidade pode ser fornecido em termos do teor de umidade gravimétrico (w), volumétrico (θ) ou grau de saturação (S).

Na realização deste ensaio foi adotado o procedimento padrão descrito na Norma ASTM D 5298-03, com algumas alterações. 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. Portanto, no presente trabalho, o papel-filtro foi usado diretamente da caixa, no estado seco ao ar. Para o papel-filtro Whatman, N° 42 a umidade inicial no estado seco ao ar é de aproximadamente 6%, o que permite medições de sucção através deste tipo de papel-filtro de zero até 29MPa (MARINHO e PEREIRA, 1998).

Outra alteração se refere ao número de papéis-filtro utilizados para uma mesma amostra. Segundo a norma ASTM D 5298-03, 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. No

procedimento deste ensaio foi utilizado apenas um papel-filtro de cada lado da amostra e a sucção foi inferida pela média do teor de umidade dos dois papéis-filtro.

Como a relação entre teor de umidade e sucção é influenciada pela umidade inicial da amostra, optou-se por moldar os corpos de prova na umidade que se pretende ter em campo e, a partir daí, as amostras foram umedecidas ou secadas.

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. Nos procedimentos deste ensaio não foi feito nenhum tipo de tratamento no papel-filtro.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada com compactação estática em anéis cilíndricos de 4,6cm de diâmetro e 2,3cm de altura. Todos os anéis foram moldados de forma que a umidade e o índice de vazios inicial fossem os mesmos. No processo de umedecimento foi acrescentada ao corpo de prova já compactado, com o auxílio de uma pipeta, uma quantidade de água previamente calculada para se obter a umidade desejada. No processo de secagem as amostras foram expostas ao tempo e os teores de umidade foram controlados com relação ao peso de água perdido no processo de evaporação de cada anel. As amostras que sofreram umedecimento ficaram em repouso por aproximadamente duas horas antes do contato com o papel-filtro, para se ter uma amostra mais homogênea.

Depois dos corpos de prova moldados e com as umidades desejadas, estes foram colocados em contato direto com os papéis-filtro, um papel de cada lado da amostra. O conjunto todo foi envolto duas vezes por um papel filme. Estes procedimentos podem ser visualizados na figura 3.1. Após realizar este procedimento para todos os anéis, estes foram colocados dentro de duas caixas de isopor, na posição vertical, de modo que nenhum dos papéis-filtro adquirisse mais umidade do que o outro. As caixas foram deixadas numa sala com temperatura controlada a 20°C, de modo que não houvesse uma variação da temperatura maior que 3°C, como sugerido pela norma ASTM D 5298-03 e MARINHO (1994-b).



(a)



(b)

Figura 3-1 – Técnica do papel-filtro, (a) amostra compactada e com a umidade desejada; (b) amostra após a colocação dos dois papéis-filtro (colocados um de cada lado, em contato direto com a amostra) e envolta duas vezes no papel filme.

O período de equalização entre o papel-filtro e a amostra foi de sete dias. FEUERHARMEL *et al.* (2004) sugere 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.

Após o período de equalização, as amostras foram retiradas da caixa de isopor, os papéis-filtro foram pesados em uma balança de precisão de quatro casas decimais ($\pm 0,0001$ g), e a umidade do solo, com uma precisão de três casas decimais ($\pm 0,001$ g). Para evitar a perda e ganho de umidade do papel-filtro, estes eram pesados dentro de uma cápsula fechada e depois descontava-se o peso da cápsula vazia. Após a pesagem das amostras de solo e dos papéis-filtro estes foram colocados na estufa por um período de 24 horas e depois foram pesados secos, obtendo-se assim a umidade do papel-filtro e da amostra de solo. Com os dados de umidade do papel-filtro e a curva de calibração do mesmo, obtêm-se a sucção do solo.

O papel-filtro adotado neste ensaio foi o Whatman N° 42 e a curva de calibração usada para a determinação da sucção foi a proposta por CHANDLER *et al.* (1992) apresentada pelas equações (3.2) e (3.3).

$$S = 10^{(6,05 - 2,48 \text{ LOG } (w))} \quad \text{para } w > 47\% \quad (3.2)$$

$$S = 10^{(4,84 - 0,0622 w)} \quad \text{para } w \leq 47\% \quad (3.3)$$

Sendo:

S = Sucção (KPa);

w = umidade do papel filtro (%).

b) Extrator de Richards

Assim como o ensaio do papel-filtro, o objetivo deste ensaio também é obter pontos de uma curva de sucção *versus* teor de umidade. Diferente do método do papel-filtro, neste ensaio o único tipo de sucção que pode ser medida é a sucção mátrica.

Para desenvolvimento do presente trabalho, este ensaio foi realizado na Embrapa/RJ, segundo os procedimentos descritos em EMBRAPA (1997), que compreende os seguintes passos: a amostra de solo é colocada inicialmente em placas de cerâmica para ser saturada. Após a completa saturação, a amostra é colocada no extrator de Richards, onde será aplicada uma determinada pressão. A amostra é então deixada no aparelho até atingir a drenagem máxima da água contida nos seus poros, correspondente à pressão aplicada. Determina-se então a umidade da amostra e repete os mesmos passos, aumentando a pressão aplicada.

3.2.7) Ensaio Químicos

3.2.7.1) Composição Química

A composição química total das amostras de cinzas foi realizada por fluorescência de raio X - análise semi-quantitativa no laboratório do CETEM/MCT (Centro de Tecnologia Mineral / Ministério da Ciência e Tecnologia).

3.2.7.2) Teor de Matéria Orgânica e Valor de pH

Os ensaios de determinação do teor de matéria orgânica e do valor de pH foram realizados segundo os procedimentos descritos em EMBRAPA (1997).

3.2.7.3) Teor de Enxofre

Os ensaios para determinar os teores de enxofre total, pirítico, sulfático e orgânico foram realizados no CETEM / MCT (Centro de Tecnologia Mineral / Ministério da Ciência e Tecnologia), determinados pelos seguintes métodos: enxofre total pelo LECO, enxofre pirítico por espectrometria de absorção atômica, enxofre sulfático por gravimetria e enxofre orgânico por diferença.

3.2.7.4) Capacidade Tampão

O termo capacidade tampão do solo é adotado nas disciplinas de ciências do solo para referir-se à habilidade de um solo de manter o pH estável quando ácidos ou bases são adicionadas (BORMA *et al.*, 2003).

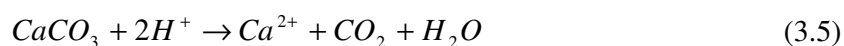
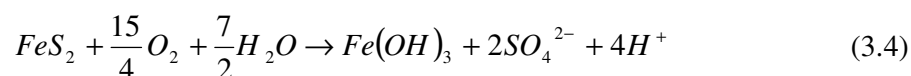
O ensaio de capacidade tampão seguiu os procedimentos propostos por YONG *et al.* (1990) descritos em BORMA (1998) e foi realizado no laboratório da COPPE/UFRJ. Para a execução do ensaio são preparadas soluções cuja concentração de ácido nítrico varia de 0 a 0,2 mol/l. As soluções ácidas são adicionadas ao solo na razão em massa de 1:10 de solo:solução, e postas para agitar a 150 rpm durante 24 horas à temperatura ambiente.

As suspensões são centrifugadas a 3000rpm durante 5 minutos. O pH do sistema solo:solução é medido no término deste procedimento. O resultado é apresentado sob a forma curva em um gráfico de pH da suspensão *versus* o cmol ácido adicionado por H⁺ kg⁻¹ de solo.

3.2.7.5) Balanço Ácido-Base

Os ensaios consistem em estimar o potencial de geração de acidez (PA) e o potencial de neutralização (PN) para fazer uma estimativa do potencial de neutralização apurado (PNA), que é obtido pela diferença entre o potencial de neutralização e o potencial de geração de acidez (PNA = PN - PA).

Segundo SOUZA (2001) a suposição teórica para a determinação do potencial de geração de acidez (PA) é que todo o potencial gerador de ácido está presente como FeS₂, a qual é totalmente oxidada de acordo com a reação ideal descrita na equação (3.4). A base teórica para o cálculo do potencial de neutralização (PN) é a equação (3.5).



Da equação (3.4), cada mol de enxofre (S) produz 2H⁺, o que de acordo com a equação (3.5), pode ser neutralizado por 1mol de CaCO₃. Portanto, 1mol de enxofre (S) é neutralizado pelo equivalente a 1mol de CaCO₃ ou 1g de enxofre por 3,125g de CaCO₃. Uma vez que usualmente o potencial gerador de acidez (PA) é expresso em Kg/t, este pode ser calculado pela equação (3.6). O potencial de neutralização é obtido com a realização do ensaio descrito em SOBEK *et al.* (1978).

$$PA = \%S \times 31,25 \text{ (Kg CaCO}_3\text{/t material)} \quad (3.6)$$

3.2.7.6) Lixiviação

O ensaio de lixiviação foi realizado segundo a norma NBR 10005/2004, com o objetivo de classificar o resíduo como tóxico ou não tóxico. Para este fim, foi utilizada a listagem da norma NBR 10004/2004 – anexo F. Esta listagem fornece os valores

máximos permitidos para extratos lixiviados. Portanto, quando a análise dos elementos químicos do extrato lixiviado apresenta algum valor superior ao encontrado na referida listagem, o resíduo é classificado como tóxico de acordo com as definições apresentadas na norma NBR 10004/2004. Caso contrário, o mesmo é classificado como resíduo não tóxico. A toxicidade do resíduo é apenas uma das características que pode classificá-lo como Resíduo Classe I - Perigoso segundo definição da norma NBR 10004/2004. As outras características são: inflamabilidade, corrosividade, reatividade e patogenicidade.

Para a realização deste ensaio não foi utilizado o agitador rotatório de frascos como sugerido na norma NBR 10005/2004, por não ser um equipamento fácil de ser encontrado no mercado. O agitador utilizado neste ensaio foi o aparelho JAR-TEST (equipamento rotatório sugerido pela antiga norma de lixiviação NBR 10005/1987). A norma NBR 10005/2004 sugere o uso de 100g de material e um volume de solução de extração correspondente a 20 vezes o peso do material usado. Mas como não foi usado o equipamento rotatório sugerido e para garantir que não haveria estratificação da amostra e que todas as partículas da amostra ficariam submetidas ao contato do líquido extrator, usou-se apenas 30g de material, respeitando a proporção de solução de extração de 20 vezes o valor do peso do material usado.

3.2.7.7) Solubilização

O ensaio de solubilização foi realizado segundo a norma NBR 10006/2004, com a finalidade de classificar o resíduo como: Resíduo Classe II A – Não Inerte ou Resíduo Classe II B – Inerte. Para esta classificação foi utilizada a listagem da norma NBR 10004/2004 – anexo G. Esta listagem fornece os valores máximos permitidos para extratos solubilizados. Portanto, quando a análise dos elementos químicos do extrato solubilizado apresenta algum valor superior ao da referida listagem, o resíduo é classificado com não inerte, caso contrário, este é classificado como resíduo inerte de acordo com as definições apresentadas na norma NBR 10004/2004 para resíduos sólidos. O ensaio de solubilização é realizado em duplicata.

3.2.8) Ensaio Mineralógico

O método escolhido para caracterizar os constituintes mineralógicos presentes no solo foi a difração de raios-X. O ensaio de difração de raios-X foi realizado no laboratório do CETEM/MCT (Centro de Tecnologia Mineral / Ministério da Ciência e Tecnologia).

Capítulo 4 – Apresentação e Discussão dos Resultados

4.1) Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados e as análises dos ensaios descritos no capítulo anterior para as amostras de cinza de fundo, cinza volante, argila (Jazida Picollo) e areia. Como o objetivo desta dissertação é avaliar as cinzas de carvão quanto ao potencial de uso como um material alternativo de um sistema de cobertura, as amostras de cinza de fundo e cinza volante foram caracterizadas a partir de ensaios geotécnicos, químicos e mineralógicos. Esses ensaios tiveram por objetivo uma melhor compreensão do material em estudo. As amostras de argila foram analisadas por ser um material integrante do sistema de cobertura e a areia, por ser o material que se pretende substituir pela cinza. Para a caracterização das amostras de argila e de areia foram realizados apenas ensaios geotécnicos.

Como mencionado no primeiro capítulo, alguns dos resultados apresentados neste capítulo foram determinados por MENDONÇA (2004). A referida autora está realizando sua tese de doutorado em estudos de difusão de gases em solos, e os materiais utilizados são basicamente os mesmos para ambas as pesquisas.

4.2) Cinza de Fundo e Cinza Volante

4.2.1) Densidade Real dos Grãos

Os resultados obtidos para densidade real dos grãos encontram-se listados na tabela 4.1.

Tabela 4-1 – Resultados do ensaio de densidade real dos grãos.

| Amostra | Densidade real dos grãos (G_s) |
|---------------------|------------------------------------|
| Cinza de Fundo (CF) | 2,043 |
| Cinza Volante (CV) | 2,090 |

MENDONÇA (2004) realizou os ensaios com cinzas de fundo e volante provenientes da mesma usina termelétrica, porém coletada em épocas diferentes, obtendo os seguintes resultados para a densidade real dos grãos: cinza de fundo; 1,958 e cinza volante; 2,092. A referida autora também realizou os ensaios segundo a norma DNER-ME 093/94.

CHIES *et al.* (2003) realizaram ensaios de densidade real dos grãos para amostras de cinza de fundo provenientes de cinco lugares diferentes, como mostra a tabela 4.2, no entanto, os referidos autores não especificam qual o método utilizado para a realização do ensaio. Vale ressaltar que a cinza de fundo referida como Tubarão tem a mesma procedência da cinza de fundo do presente estudo.

Tabela 4-2 – Valores de densidade real dos grãos para algumas cinzas de fundo CHIIES *et al.* (2003).

| Procedência das cinzas de fundo | Densidade real dos grãos (G) |
|---------------------------------|------------------------------|
| Copesul | 2,280 |
| Tubarão | 2,120 |
| Charqueadas | 2,210 |
| Riocell | 2,090 |
| Candiota | 2,270 |

Comparando os resultados descritos acima, pode-se concluir que, em relação à cinza volante, o valor obtido neste estudo foi o mesmo obtido por MENDONÇA (2004). Em relação a cinza de fundo, foram obtidos três valores distintos para amostras provenientes do mesmo local, os valores foram: 1,958, 2,043 e 2,120. Apesar dos valores serem bem próximos, avalia-se que exista uma diferença entre as características da cinza de fundo que são coletadas em épocas diferentes.

4.1.2) Limites de Atterberg

Os ensaios para determinação dos limites de Atterberg constataram que tanto a cinza de fundo quanto a cinza volante são consideradas materiais não plásticos. CHIES *et al.*, (2003) observavam o mesmo comportamento para todas as cinzas de fundo estudadas por eles, como era de se esperar.

4.2.3) Análise Granulométrica

As figuras 4.1 e 4.2 apresentam as curvas granulométricas da cinza de fundo e da cinza volante realizados no presente trabalho, respectivamente.

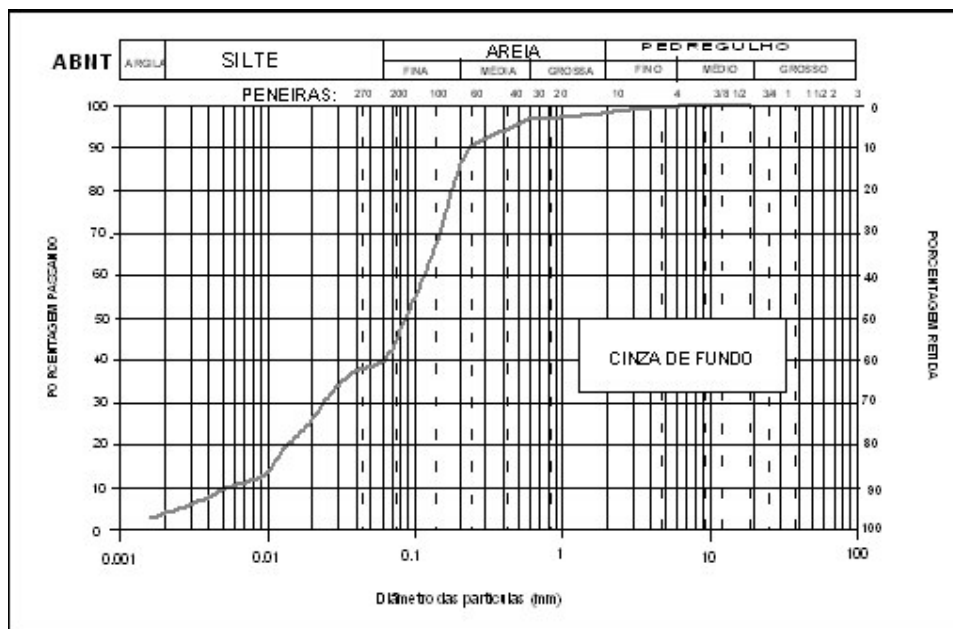


Figura 4-1 – Curva granulométrica da cinza de fundo.

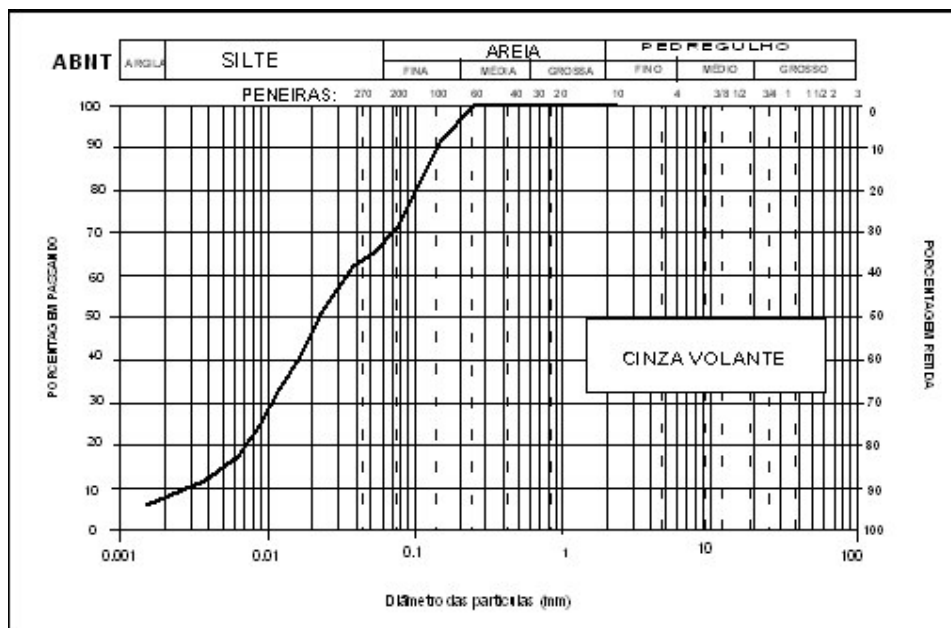


Figura 4-2 – Curva granulométrica da cinza volante.

A tabela 4.3 apresenta os resultados, em porcentagens, do ensaio de análise granulométrica para a cinza de fundo e cinza volante, realizados no presente estudo. A tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos por MENDONÇA (2004) e a tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos por CHIES *et al.* (2003) para algumas amostras de cinza de fundo.

Tabela 4-3 – Resultados da análise granulométrica.

| Amostra | Argila (%) | Silte (%) | Areia | | | Pedregulho |
|----------------|------------|-----------|----------|-----------|------------|------------|
| | | | Fina (%) | Média (%) | Grossa (%) | Fino (%) |
| Cinza de fundo | 4 | 36 | 45 | 12 | 1 | 2 |
| Cinza volante | 8 | 60 | 29 | 3 | - | - |

Tabela 4-4 Resultados da análise granulométrica realizada por MENDONÇA (2004).

| Amostra | Argila (%) | Silte (%) | Areia | | | Pedregulho | |
|----------------|------------|-----------|----------|-----------|------------|------------|-----------|
| | | | Fina (%) | Média (%) | Grossa (%) | Fino (%) | Médio (%) |
| Cinza de fundo | 1 | 10 | 39 | 29 | 13 | 6 | 2 |
| Cinza volante | 2 | 67 | 27 | 4 | - | - | - |

Tabela 4-5 Resultados da análise granulométrica obtidos por CHIES *et al.* (2003) para amostras de cinza de fundo.

| Procedência das cinzas de fundo | Argila (%) | Silte (%) | Areia | | | Pedregulho |
|---------------------------------|------------|-----------|----------|-----------|------------|------------|
| | | | Fina (%) | Média (%) | Grossa (%) | Fino (%) |
| Copesul | 2 | 56 | 29 | 9 | 3 | 1 |
| Tubarão | - | 33 | 35 | 22 | 8 | 2 |
| Charqueadas | 1 | 44 | 41 | 13 | 1 | - |
| Riocell | 1 | 29 | 34 | 26 | 10 | - |
| Candiota | 1 | 30 | 42 | 20 | 7 | - |

Novamente pode ser observado, que existe uma semelhança entre as cinzas volante e uma diferença entre as cinzas de fundo, mesmo aquelas provenientes do mesmo local.

4.2.4) Ensaio de Compactação

As curvas de compactação da cinza de fundo e cinza volante encontram-se apresentadas nas figuras 4.3 e 4.4, respectivamente. A tabela 4.6 apresenta um resumo dos valores de umidade ótima (W_{otm}) e de peso específico aparente seca máximo ($\bar{Q}_{d\ máx}$) para as cinzas em estudo.

Tabela 4-6 – Valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.

| Amostra | W_{otm} (%) | $\bar{Q}_{d\ máx}$ (KN/m ³) |
|----------------|---------------|---|
| Cinza de fundo | 40 | 9,9 |
| Cinza volante | 29 | 11,8 |

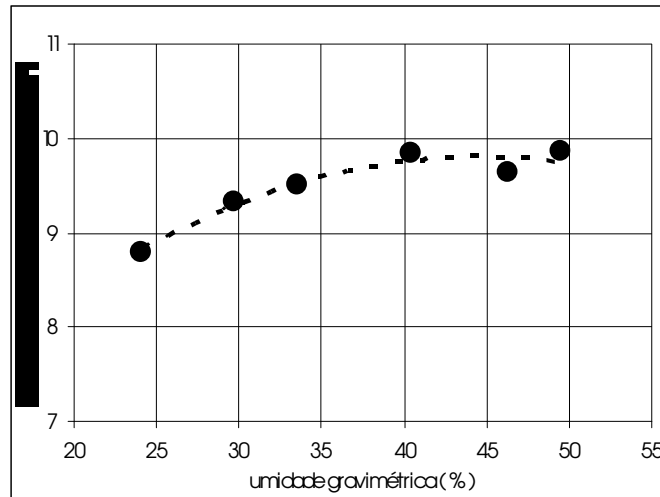


Figura 4-3 – Curva de compactação da cinza de fundo.

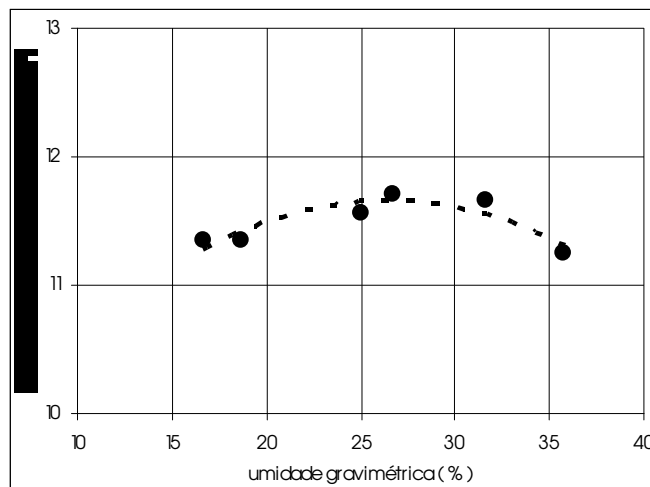


Figura 4-4 – Curva de compactação da cinza volante.

Como esperado, as curvas de compactação das cinzas não apresentam pontos de umidade ótima e de massa específica aparente seca máxima bem definidos. Curvas semelhantes foram encontradas na literatura para este tipo de material, como pode ser visto nas figuras 4.5 e 4.6. A figura 4.5 de NISHIKAWA *et al.* (2002) apresenta diversas curvas de compactação para cinzas de carvão, o autor não especifica se as cinzas estudadas por ele são cinzas de fundo ou cinzas volante, porém, as curvas granulométricas das cinzas N^o1 e N^o2 são semelhantes à curva granulométrica obtida na presente pesquisa para a cinza volante. A figura 4.6 de HEINECK (2000) apresenta a

curva de compactação de uma cinza de fundo proveniente da queima de carvão na Usina Termelétrica de Charqueadas, localizada no município de Charqueadas – RGS, semelhante à curva de compactação apresentada neste estudo para a amostra de cinza de fundo.

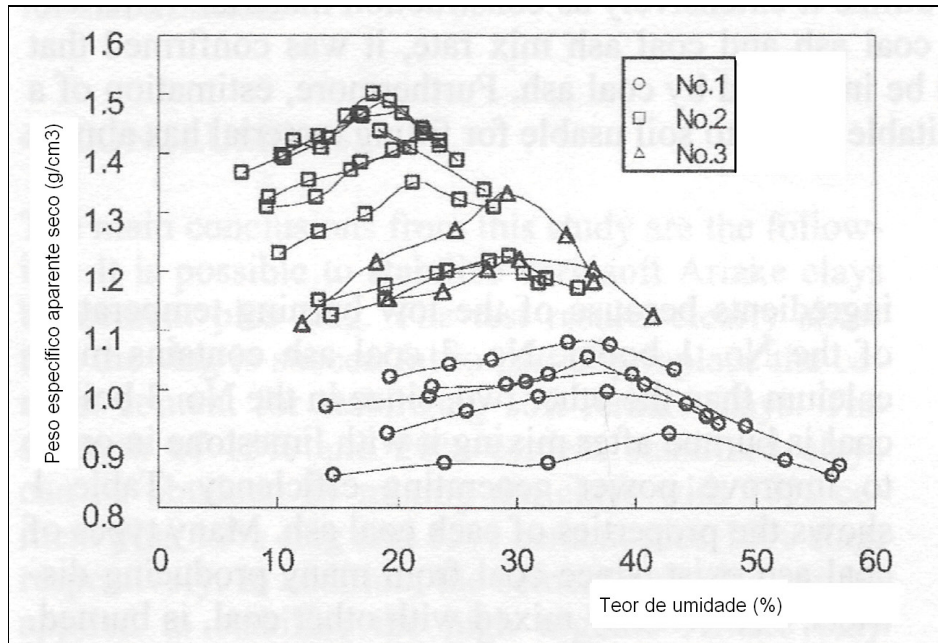


Figura 4-5 – Curvas de compactação de cinzas de carvão (NISHIKAWA et al., 2002).

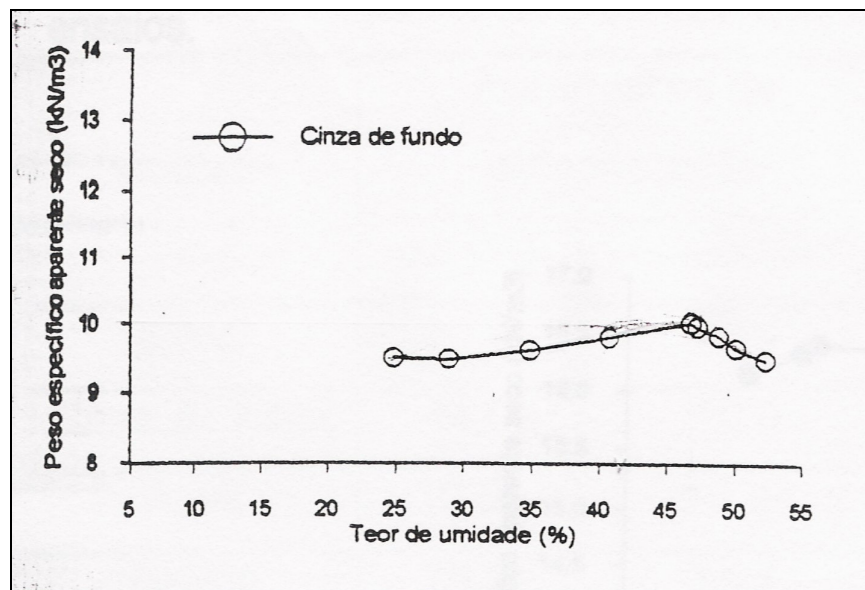


Figura 4-6 – Curva de compactação de cinza de fundo proveniente da usina termelétrica de Charqueadas (HEINECK, 2000).

4.2.5) Ensaio de Adensamento

O ensaio de adensamento foi realizado com sete estágios de carregamento (3,125; 6,25; 21,5; 25; 50; 100 e 200KPa) e quatro estágios de descarregamento (100; 50; 25 e 12,5 KPa). Os corpos de prova foram compactados estaticamente na umidade ótima, com índice de vazios referente ao $\tilde{C}_{d\text{máx}}$ da curva de compactação. Após o primeiro estágio de carregamento o corpo de prova foi inundado. Os resultados do ensaio de adensamento das amostras de cinza de fundo e cinza volante estão apresentados nas figuras 4.7 e 4.8, respectivamente.

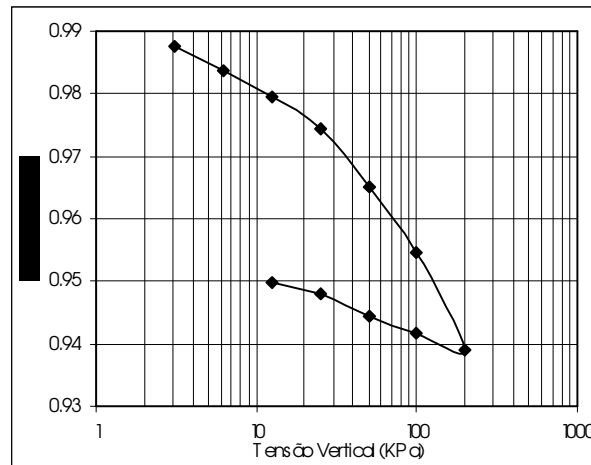


Figura 4-7 – Ensaio de adensamento da cinza de fundo.

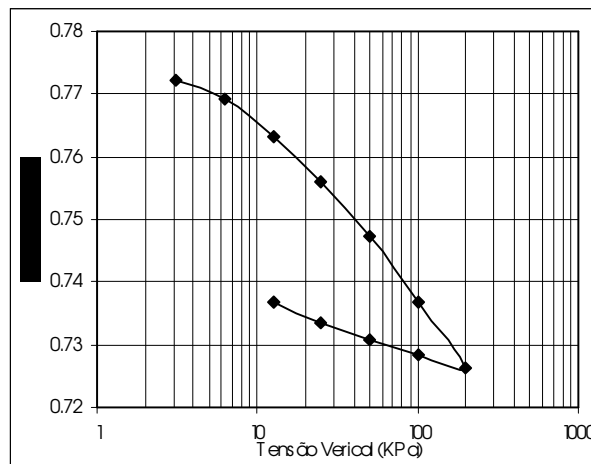


Figura 4-8- Ensaio de adensamento da cinza volante.

O principal objetivo deste ensaio foi determinar o coeficiente de variação volumétrica (M_v), dado pela equação (4.1).

$$M_v = -\frac{de}{d\sigma_v(1+e_0)} \quad (4.1)$$

Onde: M_v = coeficiente de variação volumétrica (1/KPa)

e_0 = índice de vazios inicial.

de = variação linear do índice de vazios;

$d\sigma_v$ = variação linear da tensão vertical.

A equação 4.1 é válida admitindo-se uma variação linear entre as tensões verticais e os índices de vazios. Os valores de M_v foram calculados para cada estágio de carregamento e estão apresentados nas tabelas 4.7 e 4.8 para as amostras de cinza de fundo e cinza volante, respectivamente.

Tabela 4-7 – Valores de M_v para cinza de fundo.

| Variação de tensões (KPa) | M_v (1/KPa) |
|---------------------------|---------------|
| 3,125 – 6,25 | 6,19E-04 |
| 6,25 – 12,5 | 3,53E-04 |
| 12,5 – 25 | 2,03E-04 |
| 25 – 50 | 1,90E-04 |
| 50 – 100 | 1,06E-04 |

Tabela 4-8 – Valores de M_v para cinza volante.

| Variação de tensões (KPa) | M_v (1/KPa) |
|---------------------------|---------------|
| 3,125 – 6,25 | 5,16E-04 |
| 6,25 – 12,5 | 5,42E-04 |
| 12,5 – 25 | 3,33E-04 |
| 25 – 50 | 1,97E-04 |
| 50 – 100 | 1,19E-04 |
| 100 – 200 | 6,14E-05 |

4.2.6) Condutividade Hidráulica Saturada

Os coeficientes de condutividade hidráulica saturada das cinzas de fundo e volante obtidos no ensaio de permeabilidade estão listados na tabela 4.9. O ensaio foi realizado com amostras compactadas estaticamente, mantendo-se os parâmetros de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo obtidos na curva de compactação.

Tabela 4-9 – Coeficientes de condutividade hidráulica saturada das cinzas de fundo e volante.

| Amostra | $K_{20^{\circ}\text{C}}$ (cm/s) | e |
|----------------|---------------------------------|------|
| Cinza de Fundo | $2,45 \times 10^{-4}$ | 1,06 |
| Cinza Volante | 6×10^{-5} | 0,77 |

Conforme os resultados apresentados na tabela 4.9, a cinza de fundo é 10 vezes mais permeável do que a cinza volante, resultado compatível com a granulometria e com o índice de vazios. A tabela 4.10 apresenta os valores obtidos por CHIES, *et al.* (2003) de condutividade hidráulica saturada de cinzas de fundo provenientes de diferentes localidades. Os referidos autores realizaram os ensaios em corpos de prova compactados a 95-100% da massa específica aparente seca máxima do ensaio de compactação, na energia do Proctor normal.

Tabela 4-10- Coeficientes de condutividade hidráulica para a cinza de fundo (CHIES et al., 2003).

| Procedência das cinzas | Copesul | Tubarão | Charqueadas | Riocell | Candiota |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $K_{20^{\circ}\text{C}}$ (cm/s) | $0,90 \times 10^{-4}$ | $2,49 \times 10^{-4}$ | $3,50 \times 10^{-4}$ | $0,73 \times 10^{-3}$ | $2,87 \times 10^{-3}$ |

O valor de permeabilidade saturada obtido no presente estudo para a cinza de fundo mostra-se concordante com o valor obtido por CHIES *et al.* (2003) para a cinza de fundo proveniente da mesma localidade (cidade de Tubarão).

4.2.7) Curva Característica

A obtenção das curvas características foi feita utilizando os métodos do papel-filtro e extrator de Richards, sendo este último realizado em duplicata. Todas as amostras foram moldadas com compactação estática. As amostras de cinza de fundo foram compactadas com umidade gravimétrica de 40% e índice de vazios de 1,06 e as amostras de cinza volante foram compactadas com umidade gravimétrica de 29% e índice de vazios de 0,77.

Existem diversas proposições matemáticas de ajuste da curva característica, assim como descrito no item (2.3.4.2) do segundo capítulo desta dissertação. A proposição utilizada neste trabalho foi a de FREDLUND e XING (1994), descrita na equação (4.2), a escolha desta proposição foi feita, pelo fato do programa SOILCOVER utilizá-la.

$$\theta = C(\Psi) \frac{\theta_s}{\ln \left[e + \left(\frac{\Psi}{a} \right)^n \right]^m} \quad (4.2)$$

$$C(\Psi) = 1 - \frac{\left[\ln \left(\frac{1 + \Psi}{\Psi_r} \right) \right]}{\left[\ln \left(\frac{1 + \Psi_o}{\Psi_r} \right) \right]}$$

Onde:

θ = teor de umidade volumétrico;

θ_s = teor de umidade volumétrico saturado;

θ_r = teor de umidade volumétrico residual;

Ψ = sucção (KPa);

Ψ_r = sucção residual (KPa);

Ψ_o = sucção de entrada de ar (KPa);

$C(\Psi)$ = função de correção;

s = inclinação da linha que tangencia o ponto de inflexão da curva característica

$e = 2,718$;

$$\varnothing_0 = 10^6 \text{ KPa};$$

$$\alpha = \varnothing_b;$$

$$m = 3,67 \ln \left(\frac{\theta_s}{\theta_r} \right);$$

$$n = \left[\frac{1,31^{(m+1)}}{m\theta_s} \right] 3,72s\Psi_b.$$

Os dados referentes ao ensaio do papel-filtro foram obtidos em umidade gravimétrica (w), e a fórmula utilizada para converter umidade gravimétrica em umidade volumétrica (θ) é dada por HILLEL (1971), de acordo com a equação (4.3).

$$\theta = \left(\frac{w \times \gamma_s}{\gamma_w} \right) \quad (4.3)$$

Onde: $\tilde{\gamma}_s$ = peso específico seco das partículas sólidas;

$\tilde{\gamma}_w$ = peso específico da água.

As figuras 4.9 e 4.10 apresentam os dados das curvas de retenção solo-água e os ajuste das curvas obtidos pela proposição matemática de FREDLUND e XING (1994), para as amostras de cinza de fundo e cinza volante, respectivamente. Os dados apresentados referem-se aos dados obtidos em laboratório pelo método do papel-filtro (PF) e pelo método do extrator de Richards (ER). As duplicatas são representadas por (ER1) e (ER2). Os parâmetros empíricos de ajuste (a , m e n) da proposição matemática proposta por FREDLUND e XING (1994), foram fornecidos pelo programa SOILCOVER.

Os valores dos parâmetros empíricos (a , m , e n) e o valor da umidade volumétrica saturada estão apresentados nas tabelas 4.11 e 4.12 para cinza de fundo e cinza volante, respectivamente.

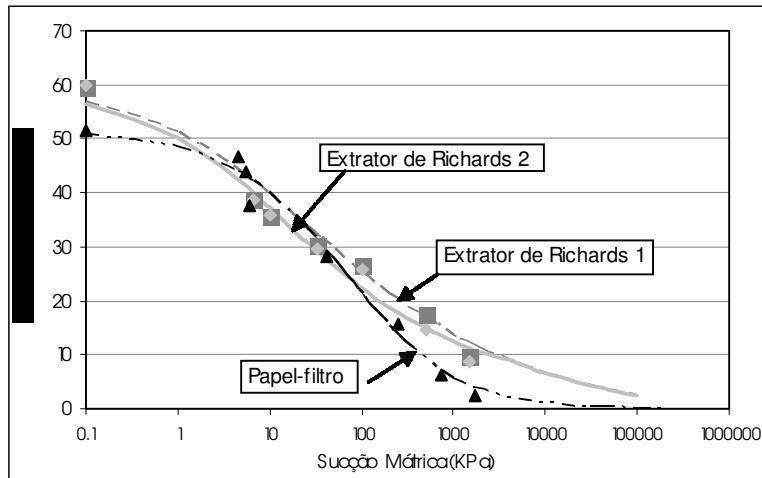


Figura 4-9- Curvas características da cinza de fundo.

Tabela 4-11 – Parâmetros empíricos da equação de FREDLUND E XING (1994) e o valor da umidade volumétrica saturada das curvas de cinza de fundo representadas no gráfico 4.7.

| Parâmetros Empíricos | Curva PF | Curva ER1 | Curva ER2 |
|----------------------|----------|-----------|-----------|
| a | 104,14 | 3,89 | 6,6 |
| n | 0,63 | 0,56 | 0,53 |
| m | 3,31 | 1,0 | 1,48 |
| $\bar{e}_{sat} (\%)$ | 51,5 | 59,5 | 59,8 |

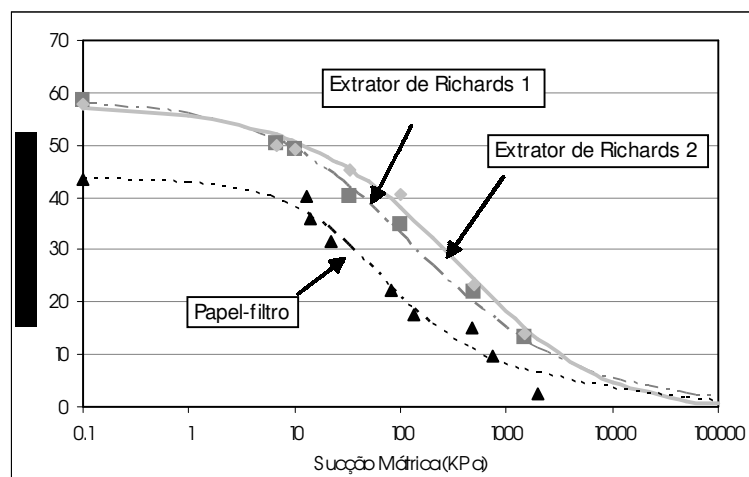


Figura 4-10 – Curvas características da cinza volante.

Tabela 4-12 – Parâmetros empíricos da equação de FREDLUND e XING (1994) e o valor da umidade volumétrica saturada das curvas de cinza volante representadas no gráfico 4.8.

| Parâmetros Empíricos | Curva PF | Curva ER1 | Curva ER2 |
|-----------------------------------|----------|-----------|-----------|
| a | 34,85 | 52,97 | 606,46 |
| n | 0,98 | 0,63 | 0,54 |
| m | 1,34 | 1,52 | 3,37 |
| $\bar{\epsilon}_{\text{sat}}$ (%) | 43,5 | 58,5 | 57,7 |

Observa-se uma boa repetibilidade de dados obtidos pelo extrator de Richards (ER1 e ER2), tanto para a cinza de fundo quanto para a cinza volante. Entretanto, quando comparamos os dois métodos utilizados - extrator de Richards e papel-filtro – pode-se observar que há diferença entre as curvas, principalmente para a amostra de cinza volante. Uma das diferenças entre as curvas obtidas pelos dois métodos são os valores de umidade volumétrica saturada. Uma possível explicação para a diferença nos valores de umidade saturada seria uma variação entre os índices de vazios iniciais dos dois ensaios. Apesar de todos os corpos de prova utilizados no método do papel-filtro e no método do extrator de Richards partirem de um mesmo índice de vazios e de uma mesma umidade inicial, o corpo de prova do método do extrator de Richards deve ter sofrido alguma desestruturação, e conseqüente aumento do índice de vazios. Porque para o método do extrator de Richards o corpo de prova é primeiro saturado, o que pode ter provocado uma expansão da amostra.

4.2.8) Permeabilidade não saturada

Devido à grande dificuldade de medição da permeabilidade não saturada em laboratório, esta é geralmente obtida por meio de correlações entre a curva característica solo-água e a permeabilidade saturada. Neste trabalho são apresentadas às curvas de permeabilidade não saturada *versus* sucção mátrica que foram geradas pelo programa SOILCOVER. O programa utiliza a equação de FREDLUND *et al.* (1994), equação (4.4), para o cálculo da permeabilidade não saturada.

$$K(\Psi) = K_s \frac{\int_{\ln(\Psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\Psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\Psi_{aev})}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (4.4)$$

Onde:

K = permeabilidade não saturada (cm/s);

K_s = permeabilidade saturada (cm/s);

Ψ_{aev} = sucção de entrada de ar (KPa);

Ψ = sucção (KPa);

$b = \ln(10^6)$;

θ = teor de umidade volumétrico;

θ_s = teor de umidade volumétrico saturado;

$e = 2,71828$;

y = variável de integração que representa o logaritmo da sucção;

θ' = a primeira derivada da equação de FREDLUND e XING (1994) para a curva característica (equação 4.2).

As figuras 4.11 e 4.12 apresentam as curvas de permeabilidade não saturada *versus* sucção mátrica para as amostras de cinza de fundo e cinza volante, respectivamente. E como pode ser observada a cinza de fundo apresenta uma queda de condutividade hidráulica com a diminuição da saturação mais acentuada do que a cinza volante. Este comportamento é compatível com o comportamento de material granular desejado para a barreira capilar.

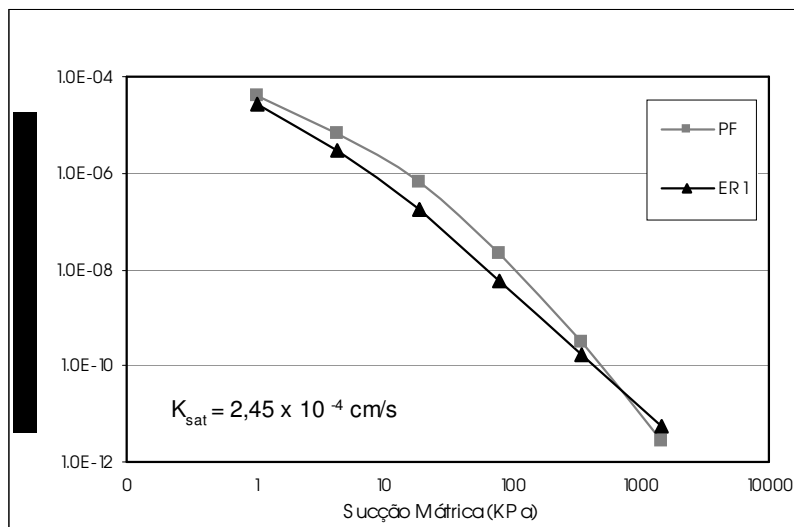


Figura 4-11– Curvas de permeabilidade não saturada *versus* sucção mátrica calculada pelo programa SOILCOVER para cinza de fundo.

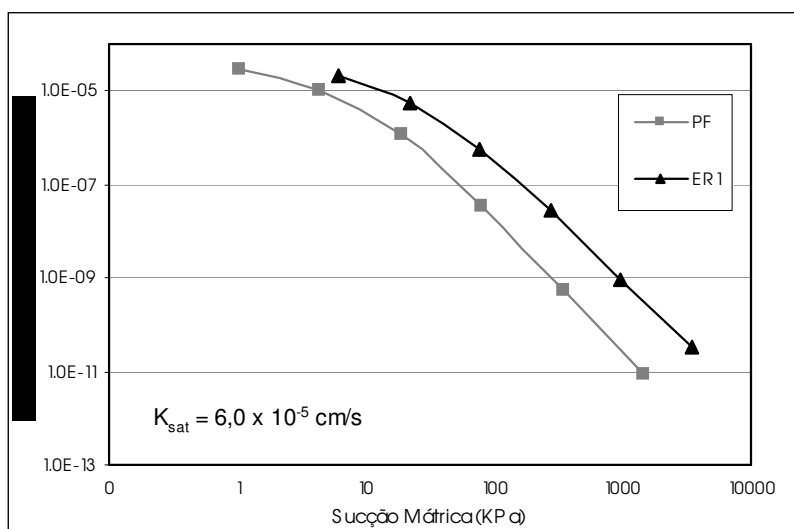


Figura 4-12– Curvas de permeabilidade não saturada *versus* sucção mátrica calculada pelo programa SOILCOVER para cinza volante.

4.2.9) Composição Química

Os resultados da composição química da cinza de fundo e da cinza volante estão apresentados na tabela 4.13, os quais foram obtidos por MENDONÇA (2004).

Tabela 4-13 – Composição química da cinza de fundo e da cinza volante.

| | <i>Cinza de fundo (10 g)</i> | <i>Cinza volante (10g)</i> |
|--------------------------------|--|--|
| SiO ₂ | 57,9% | 57,1% |
| Al ₂ O ₃ | 27,2% | 28,7% |
| Fe ₂ O ₃ | 5,5% | 4,4% |
| CaO | 1,4% | 2,0% |
| MgO | 0,64% | 0,72% |
| K ₂ O | 2,5 % | 2,6% |
| TiO ₂ | 1,1% | 1,3% |
| ZrO ₂ | 0,12% | 0,13% |
| SO ₃ | <200ppm | 1,0% |
| CdO | - | - |
| PbO | - | <200ppm |
| Cl ⁻ | 1,7% | 0,09% |
| S | <200ppm | 0,4% |
| Perda ao fogo | 1,6% | 0,66% |
| Elementos traços (<200ppm) | Na ₂ O, MnO ₂ , ZnO, P, Cr, Co, Ni, Cu, Rb, Sr, Y, Nb, Rh e Pr | Na ₂ O, MnO ₂ , ZnO, P, Cr, Mn, Ni, Cu, As, Rb, Sr, Y, Nb, Rh, Ba, Ce e Nd |

Como pode ser observado na tabela 4.13, tanto a cinza de fundo quanto a cinza volante são constituídas principalmente por sílica, alumina e óxido de ferro, apresentando percentagens menores de óxido de cálcio, óxido de magnésio, óxido de potássio e outros componentes.

Características semelhantes foram relatadas por CHIES *et al.* (2003). Os referidos autores apresentam as composições químicas referentes às cinzas de fundo e volante de diferentes procedências, apresentados na tabela 4.14.

Tabela 4-14 – Concentração (%) dos constituintes maiores nas cinzas de fundo e volante de diferentes procedências (CHIES *et al.*, 2003).

| | Copesul | | Tubarão | | Charqueadas | | Riocell | | <i>Candiota</i> | |
|--------------------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|-----------------|----------------|
| | <i>fundo</i> | <i>volante</i> | <i>fundo</i> | <i>volante</i> | <i>fundo</i> | <i>Volante</i> | <i>fundo</i> | <i>volante</i> | <i>Fundo</i> | <i>Volante</i> |
| SiO ₂ | 64,4 | 66,4 | 59,2 | 56,5 | 63,3 | 62,2 | 62,5 | 59,4 | 66,7 | 65,7 |
| Al ₂ O ₃ | 22 | 18,2 | 24,6 | 28 | 24,5 | 26,0 | 24,6 | 27,5 | 19,2 | 24,3 |
| Fe ₂ O ₃ | 7,1 | 6,5 | 8,2 | 6,4 | 4,5 | 2,9 | 3,9 | 2,1 | 9,0 | 4,6 |
| TiO ₂ | 0,89 | 0,8 | 1,2 | 1,31 | 0,98 | 1,1 | 0,98 | 1,15 | 0,72 | 0,69 |
| CaO | 1,70 | 2,15 | 1,34 | 0,92 | 1,31 | 1,26 | 4,7 | 2,2 | 0,6 | 0,37 |
| MgO | 0,4 | 0,88 | 0,41 | 0,45 | 0,4 | 0,35 | 0,34 | 0,43 | 0,3 | 0,46 |
| K ₂ O | 1,15 | 1,41 | 2,4 | 2,5 | 1,6 | 1,41 | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,12 |
| Na ₂ O | 0,14 | 0,34 | 0,23 | 0,23 | 0,14 | 0,18 | 0,14 | 0,12 | 0,13 | 0,1 |
| C | 0,33 | 0,14 | 2,32 | 0,21 | 3,13 | 1,09 | 1,47 | 1,19 | 0,34 | 0,05 |
| S | 0,12 | 0,09 | 0,09 | <0,05 | 0,05 | <0,05 | 0,12 | 0,09 | <0,05 | <0,05 |

4.2.10) Teor de Matéria Orgânica e valor do pH

Os teores de matéria orgânica e valor de pH das amostras de cinza de fundo e cinza volante são apresentados na tabela 4.15 e foram obtidos de ensaios realizados por MENDONÇA (2004).

Tabela 4-15 – Teor de matéria orgânica e valor de pH.

| Amostras | M.O. (%) | pH |
|----------------|----------|------|
| Cinza Volante | 1,03 | 12,3 |
| Cinza de Fundo | 2,09 | 7,9 |

4.2.11) Teor de Enxofre

Os valores de teor de enxofre total, enxofre pirítico, enxofre sulfático e enxofre orgânico estão apresentados na tabela 4.16 e foram realizados por MENDONÇA (2004).

Tabela 4-16 – Tabela referente aos valores de teor de enxofre.

| Elementos / Amostras | CF | CV |
|----------------------|--------|--------|
| S total | < 0,5% | < 0,5% |
| S Pirítico | 0,05% | 0,01% |
| S Sulfático | < 0,5% | < 0,5% |
| S Orgânico | < 0,5% | < 0,5% |

4.2.12) Capacidade Tampão

As figuras 4.13 e 4.14 apresentam os resultados dos ensaios de capacidade tampão para as amostras de cinza de fundo e cinza volante, respectivamente. Estes ensaios foram realizados por MENDONÇA (2004).

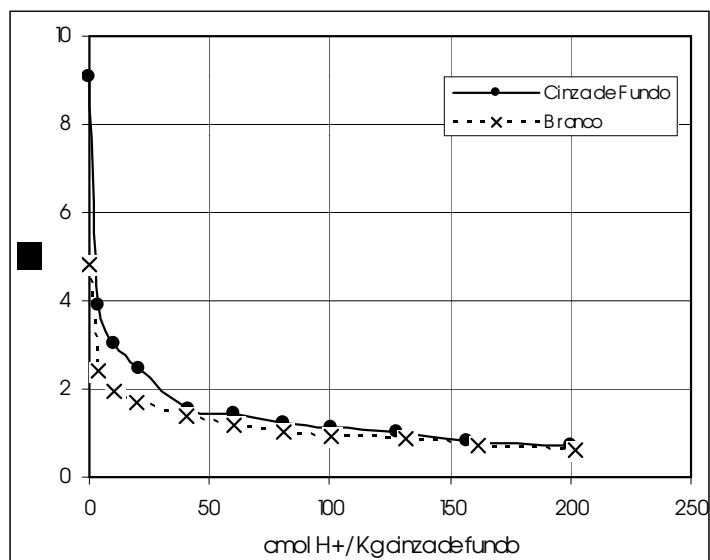


Figura 4-13 – Ensaio de capacidade tampão da cinza de fundo.

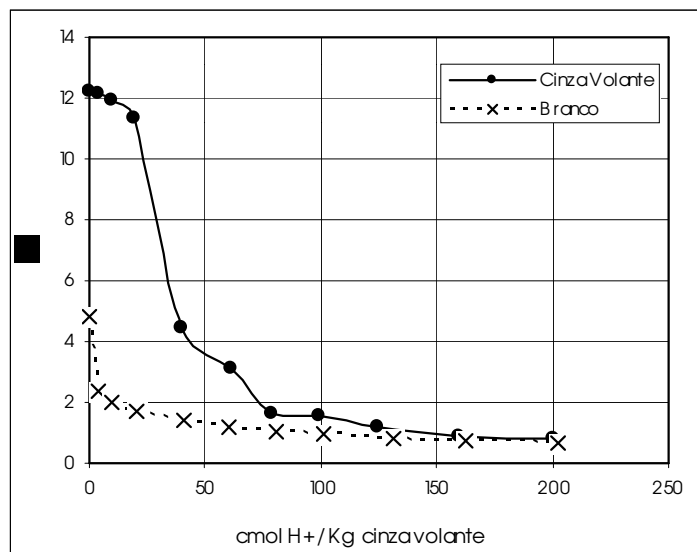


Figura 4-14 – Ensaio de capacidade tampão da cinza volante.

Como pode ser observado, a cinza de fundo não exibe capacidade tampão, ou seja, mesmo apresentando um valor de pH alcalino, a cinza de fundo não consegue se manter alcalina quando uma quantidade mínima de ácido é adicionada à amostra. Já a cinza volante apresenta uma pequena capacidade tampão, ou seja, consegue manter-se alcalina adicionando-se uma pequena quantidade de ácido à amostra (aproximadamente 20 cmol H⁺/Kg cinza volante). Entretanto, quando uma quantidade de ácido acima deste valor é adicionada à amostra, faz com que ela rapidamente se acidifique. Avalia-se desta forma, que as cinzas de fundo e volante não são indicadas como material neutralizante nem como barreira reativa.

4.2.13) Balanço Ácido-Base

Para o cálculo do potencial de geração de acidez (PA), não foram utilizados os valores de teor de enxofre total fornecidos pelo LECO, por este apresentar um limite de detecção muito alto (0,5%) e os valores encontrados para a cinza de fundo e cinza volante serem inferiores ao limite de detecção. Portanto, os valores de enxofre utilizados foram os fornecidos pelo ensaio de fluorescência de raios X, onde o limite de detecção do ensaio é de 0,02%. Os resultados obtidos foram: cinza de fundo, <0,02% e cinza volante, 0,4%.

O valor do potencial de neutralização foi obtido com a realização do ensaio desenvolvido por SOBECK *et al.* (1978) e realizado por MENDONÇA (2004). A tabela 4.17 apresenta os resultados obtidos do potencial de neutralização (PN), potencial de geração de acidez (PA) e potencial de neutralização apurado (PNA) para a cinza de fundo e cinza volante.

Tabela 4-17– Valores de PN, PA e PNA para a cinza de fundo e cinza volante.

| Amostra | PN (Kg CaCO ₃ / t material) | PA (Kg CaCO ₃ / t material) | PNA (Kg CaCO ₃ / t material) |
|---------|---|---|--|
| CF | 8,63 | 0,63 | 8,00 |
| CV | 24,83 | 12,50 | 12,33 |

De acordo com SOBECK *et al* (1978), valores de PNA • 20 são considerados como indicadores de que o material apresenta um pequeno risco de gerar ácido, enquanto valores para PNA • -20 classificariam o material como gerador de ácido. Os valores compreendidos entre 20 e -20, são mais sensíveis dentro dos aspectos classificatórios, dessa forma devem ser designados dentro do campo das incertezas. De acordo com esta classificação, as duas cinzas estudadas estão dentro do campo das incertezas.

4.2.14) Lixiviação

As análises químicas do extrato lixiviado estão apresentadas na tabela 4.18 para as duas cinzas analisadas. Estas análises foram realizadas no CETEM / MCT (Centro de Tecnologia Mineral / Ministério da Ciência e Tecnologia) por absorção atômica. Vale ressaltar que dentre os elementos indicados para análise do extrato lixiviado, pela norma NBR – 10004/2004, foram analisados somente os elementos que fazem parte da composição química das cinzas, conforme apresentado na tabela 4.13.

Os valores reportados na coluna LM da tabela 4.18, são os valores de limite máximo de cada elemento, que devem ser encontrados nos extratos lixiviados, segundo a norma NBR 10004/2004.

Tabela 4-18 – Resultados do ensaio de Lixiviação

| <i>Elementos</i> | <i>Cinza de fundo (mg/l)</i> | <i>Cinza volante (mg/l)</i> | <i>LM (mg/l)</i> |
|------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Cr | <0,05 | 0,08 | 5,0 |
| As | - | <0,5 | 1,0 |
| Ba | - | <0,1 | 70 |
| Pb | - | <0,05 | 1,0 |

Obs: LM – Limite máximo

Como pode ser observado na tabela 4.18, os valores encontrados para a cinza de fundo e cinza volante são inferiores ao limite máximo permitido pela norma. Com base nestes resultados e na definição de toxicidade, segundo a NBR 10004/2004, as cinzas em estudo são classificadas como resíduos não tóxicos.

De acordo com a definição de resíduo perigoso, da referida norma, a cinza de fundo e a cinza volante não apresentam periculosidade, portanto, não são classificadas como Resíduo Classe I – Perigoso. Este resultado está em acordo com o reportado por CHIES *et al.*, (2003), HARTLÉN *et al.* (1997).

4.2.15) Solubilização

As análises químicas realizadas no extrato solubilizado estão apresentadas na tabela 4.19. As análises foram realizadas no CETEM / MCT (Centro de Tecnologia Mineral / Ministério da Ciência e Tecnologia) por absorção atômica, com exceção dos elementos Cd e Al, que foram realizados no laboratório de química da PUC-RIO por espectrofotometria de absorção atômica. Como descrito no item anterior, foram analisados no extrato solubilizado somente os elementos que fazem parte da composição química das cinzas, conforme apresentado na tabela 4.13. Os valores reportados na coluna LM são os valores de limite máximo permitido pela norma NBR 10004/2004, para cada elemento. De acordo com os resultados obtidos e segundo a definição de resíduo não inerte, da norma NBR 10004/2004, a cinza de fundo e a cinza volante são classificadas com Resíduo Classe II A – Não Inerte.

A cinza de fundo apresentou o elemento Al com valor acima do valor permitido pela norma NBR 10004/2004, enquanto a cinza volante apresentou valores acima do valor permitido pela referida norma para os elementos Al, Cr e SO₄⁻. Entretanto, dos elementos analisados no extrato solubilizado da cinza volante, a metodologia utilizada para determinação de dois elementos apresentou valores de limite de detecção superiores ao limite máximo permitido pela referida norma, são eles: As e Pb. Portanto, em relação a estes dois elementos não pode-se afirmar que seus valores estão acima do valor máximo permitido pela referida norma.

Tabela 4-19 – Resultados do ensaio de solubilização

| <i>Elementos</i> | <i>Cinza de fundo</i> | | <i>Cinza volante</i> | | <i>LM</i> |
|------------------------------|-----------------------|-------------|----------------------|-----------------|-----------|
| | <i>(mg/l)</i> | | <i>(mg/l)</i> | | |
| Al | <u>0,32</u> | <u>0,34</u> | <u>7,1</u> | <u>6,3</u> | 0,2 |
| Cr | <0,05 | <0,05 | <u>0,24</u> | <u>0,26</u> | 0,05 |
| Fé | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,3 |
| As | - | - | <0,5 | <0,5 | 0,01 |
| Ba | - | - | <0,1 | <0,1 | 0,7 |
| Pb | - | - | <0,05 | <0,05 | 0,01 |
| Mn | <0,02 | <0,02 | 0,03 | <0,02 | 0,1 |
| Zn | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | 5 |
| Cu | <0,01 | <0,01 | 0,01 | <0,01 | 2 |
| Cl ⁻ | 9,7 | 9,3 | 0,48 | 0,43 | 250 |
| Na ⁺ | 6,31 | 6,51 | 21,7 | 22,8 | 200 |
| SO ₄ ⁻ | 53,8 | 50,1 | <u>497</u> | <u>502</u> | 250 |

Obs. Os valores precedidos do sinal menor (<) representam, em cada caso, o limite de detecção determinado no laboratório; LM – Limite máximo

4.2.16) Difração de Raios X

As figuras 4.15 e 4.16 apresentam os difratogramas da cinza de fundo e cinza volante, respectivamente. Como pode ser observado nestas figuras, tanto a cinza de fundo quanto a cinza volante são compostas de quartzo, caulinita, muscovita, gibbsita e pirita.

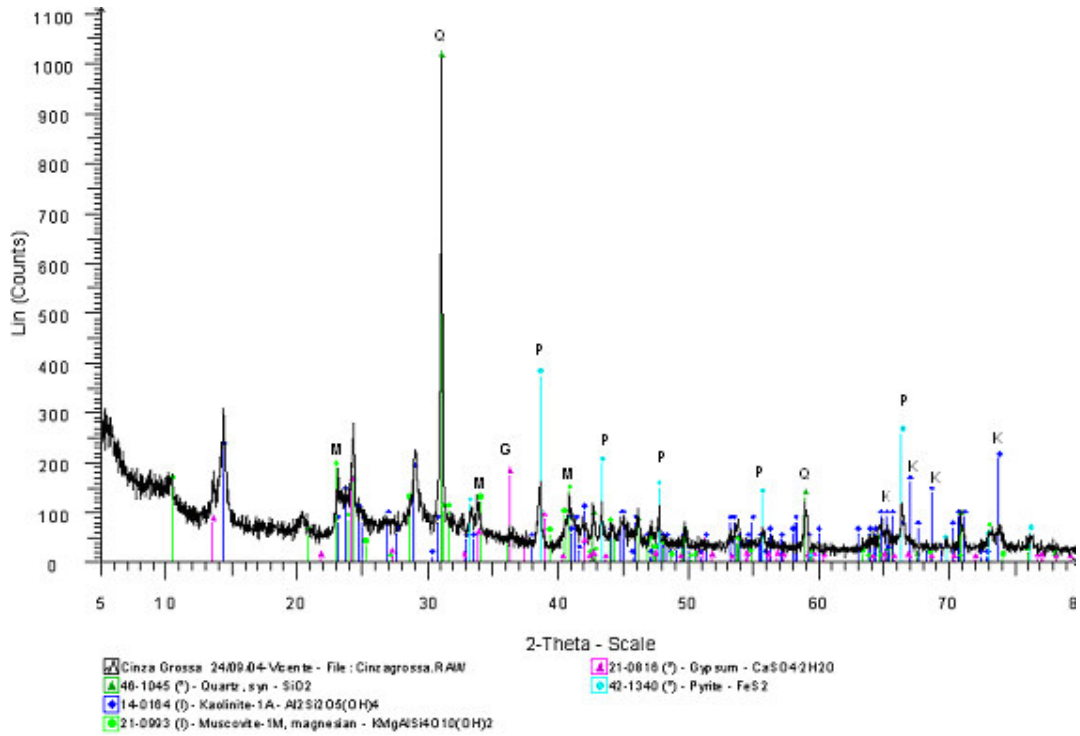


Figura 4-15 – Difratoograma de raios X da cinza de fundo

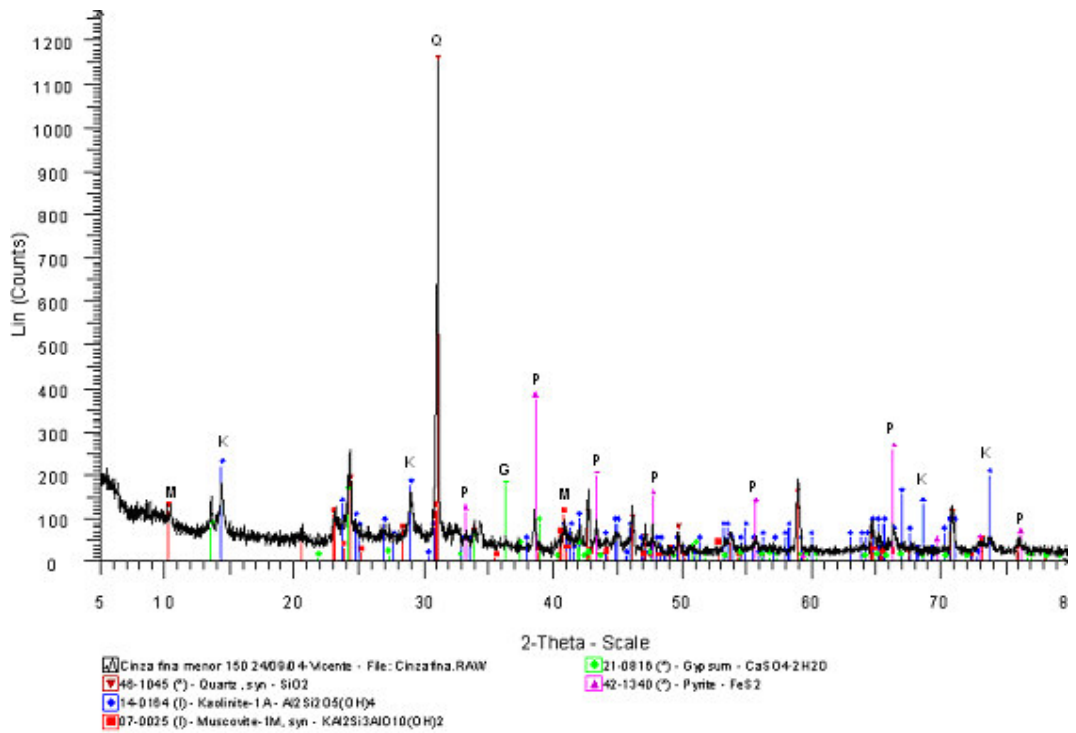


Figura 4-16– Difratoograma de raios X da cinza volante.

4.2.17) Comentários finais

Com base nos resultados apresentados, podem-se fazer os seguintes comentários em relação a ambos os tipos de cinzas: i) as cinzas apresentam características de material granular; ii) não são indicadas como material neutralizante e nem como barreira reativa; iii) de acordo com as definições da NBR 10004/2004 para resíduos sólidos, ambas foram classificadas como Resíduo Classe II A – Não Inerte, e iv) quanto ao potencial de geração de acidez, estão classificadas no campo das incertezas.

Levando-se em conta a proposta inicial do presente trabalho, que consiste no aproveitamento das cinzas geradas pela combustão do carvão como uso em sistemas de cobertura compostos por barreiras capilares, alguns aspectos devem ser colocados:

- a cinza volante produzida na usina termelétrica Jorge Lacerda-SC tem, atualmente, toda sua produção vendida para as fábricas de cimento.
- a análise do extrato solubilizado da cinza volante apresentou três elementos (Al, Cr e SO₄⁻) com valores superiores aos permitidos pela norma NBR 10004/2004;

Com base nestes aspectos, pode-se concluir que o uso da cinza volante como um material alternativo na composição de uma barreira capilar não mostrou-se viável técnica e economicamente. Dessa forma, investigou-se no presente trabalho, a viabilidade da utilização da cinza de fundo na barreira capilar, em detrimento da cinza volante.

4.3) Argila e Areia

4.3.1) Densidade Real dos Grãos

Este ensaio foi realizado por MENDONÇA (2004) onde foram determinados os valores de densidade real dos grãos de 2,581 para a argila e 2,63 para a areia.

4.3.2) Limites de Atteberg

Este ensaio foi determinado por MENDONÇA (2004). Os valores referentes à amostra de argila foram: limite de liquidez de 37,8%, limite de plasticidade de 24% e índice de plasticidade de 13,8%.

4.3.3) Análise Granulométrica

Este ensaio foi realizado por MENDONÇA (2004) e as curvas determinadas neste ensaio para as amostras de argila Picollo e de areia, estão apresentadas nas figuras 4.17 e 4.18. A tabela 4.20 apresenta os valores de percentagens de cada fração de material apresentado nas referidas figuras.

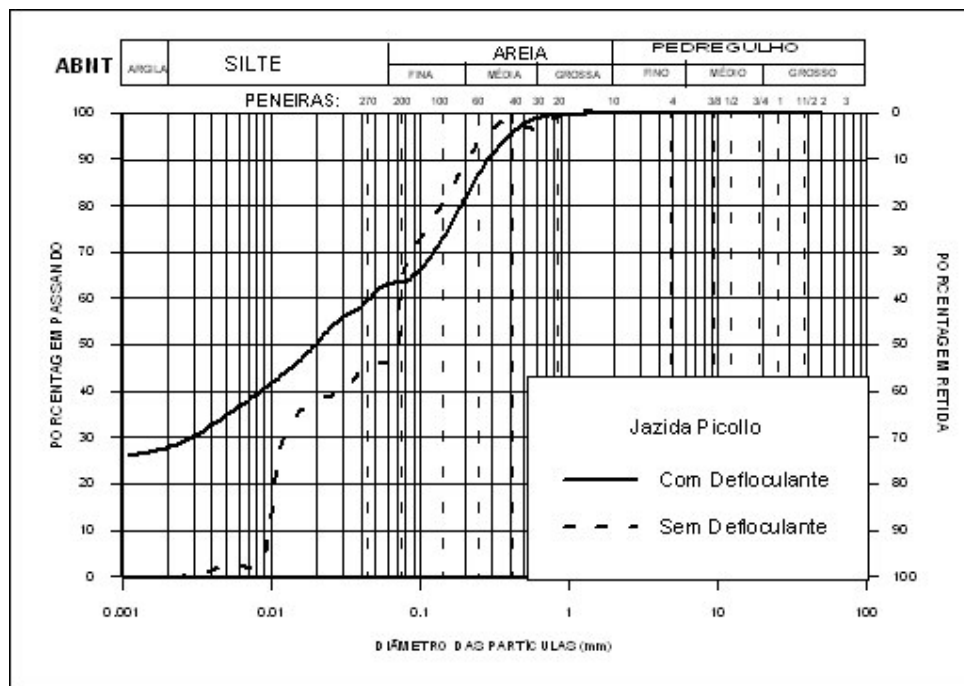


Figura 4-17 – Curva granulométrica da argila Picollo.

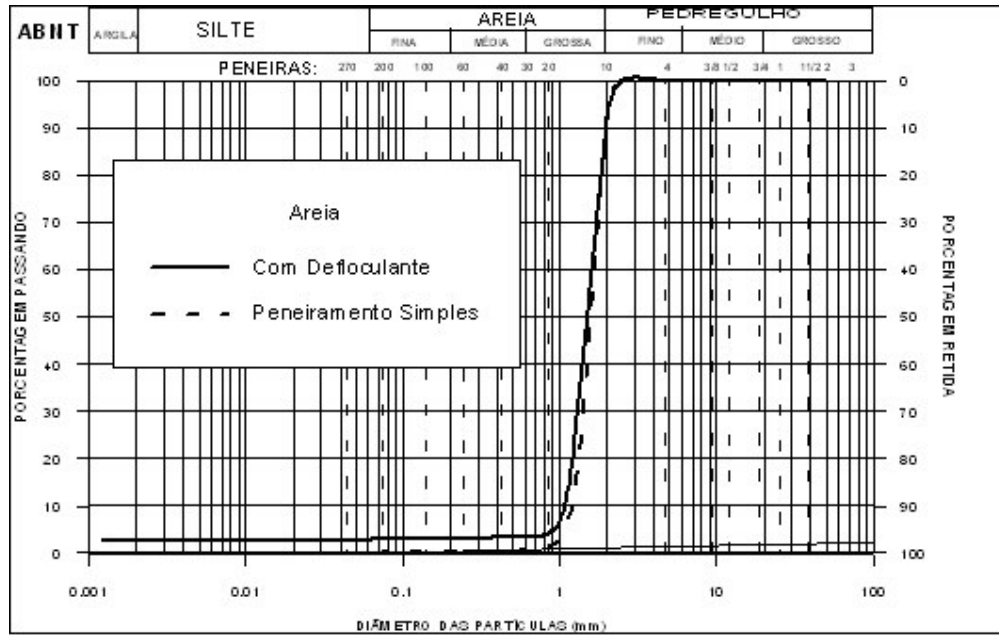


Figura 4-18 – Curva granulométrica da areia.

Tabela 4-20 – Análise granulométrica das amostras de argila e areia.

| Amostra | Argila (%) | Silte (%) | Areia | | | Pedregulho |
|---------|------------|-----------|----------|-----------|------------|------------|
| | | | Fina (%) | Média (%) | Grossa (%) | Fino (%) |
| argila | 27 | 35 | 19 | 18 | 1 | - |
| areia | 3 | - | 1 | - | 91 | 5 |

As areias com coeficientes de não uniformidade menores que 2 são consideradas “uniformes”. Como o coeficiente de não uniformidade da areia estudada é igual a 1,6. A areia em estudo é considerada uma areia de granulometria grossa e uniforme.

4.3.4) Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação foi determinado para a argila e foi realizado por MENDONÇA (2004). A curva de compactação obtida é apresentada pela figura 4.19 e os valores de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo referentes a esta curva são respectivamente 25,8% e 14,08 KN/m³.

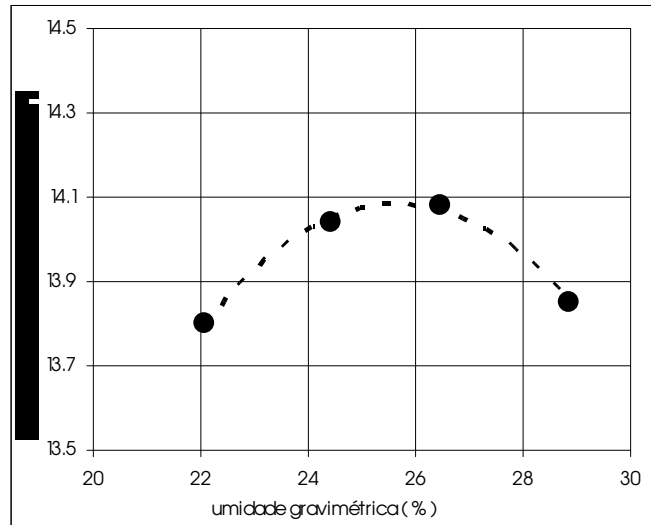


Figura 4-19 – Curva de compactação da argila.

4.3.5) Compacidade da areia

Os valores de índices de vazios encontrados neste ensaio estão apresentados na tabela 4.21.

Tabela 4-21 – Valores de índice de vazios da areia.

| <i>Procedimento</i> | <i>Índice de vazios</i> |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Funil de 10 mm de diâmetro | 0,687 |
| Funil de 18 mm de diâmetro | 0,702 |
| Funil de 25 mm de diâmetro | 0,705 |
| Funil de 50 mm de diâmetro | 0,734 |
| Funil com pequena altura de queda | 0,897 |

O índice de vazios mínimo, determinado através de vibração do recipiente, forneceu um índice de vazios maior que o obtido utilizando o procedimento do “chuveiro” com o funil de 10mm de diâmetro, portanto, para a areia estudada, foram considerados os valores de índice de vazios mínimo, 0,687 e índice de vazios máximo, 0,897.

Considerando um índice de compactação relativa de 60%, foi calculado o índice de vazios natural, segundo a equação (3.1) descrita no terceiro capítulo, e o valor encontrado foi de 0,77.

4.3.6) Ensaio de Adensamento

Este ensaio foi realizado para uma amostra de argila compactada estaticamente na umidade gravimétrica inicial de 29,7% e com índice de vazios inicial de 0,87. Após o primeiro estágio de carregamento o corpo de prova foi inundado. O resultado encontra-se na figura 4.20. Para esta amostra foram calculados os valores de coeficiente de variação volumétrica (M_v), conforme a equação 4.1 descrita no item (4.2.5) deste capítulo. Os valores de M_v encontram-se listados na tabela 4.22.

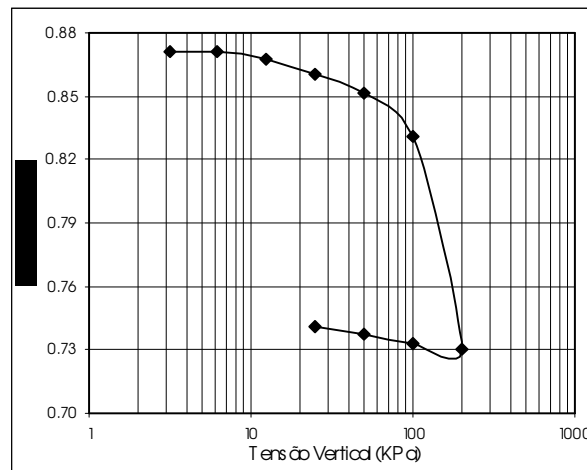


Figura 4-20 – Curva de adensamento referente à argila.

Tabela 4-22 – Valores de M_v referentes à argila

| Variação de tensões (KPa) | M_v (1/KPa) |
|---------------------------|---------------|
| 3,125 – 6,25 | 3,39E-05 |
| 6,25 – 12,5 | 2,54E-04 |
| 12,5 – 25 | 3,18E-04 |
| 25 – 50 | 1,92E-04 |
| 50 – 100 | 2,17E-04 |
| 100 - 200 | 5,51E-04 |

4.3.7) Permeabilidade saturada

O ensaio de permeabilidade saturada da argila foi realizado por MENDONÇA (2004), em um corpo de prova compactado na energia Proctor Normal e com a umidade gravimétrica inicial de 29,74%. Optou-se por realizar o ensaio de permeabilidade da argila com a umidade inicial acima da umidade ótima, porque uma das finalidades da camada de argila na barreira capilar é minimizar a entrada de oxigênio, o que significa que, a mesma deve permanecer com um elevado teor de umidade durante todo o tempo. A amostra de areia foi compactada com compactação estática na umidade gravimétrica inicial de 8%. Para a amostra de argila foi realizado ensaio com carga variável e para a amostra de areia, carga constante. Os resultados referentes aos ensaios de permeabilidade saturada para as amostras de areia e argila encontram-se descritos na tabela 4.23.

Tabela 4-23 – Resultados de Permeabilidade saturada.

| Amostras | $K_{20^{\circ}C}$ (cm/s) | e |
|----------|--------------------------|-------|
| Argila | $1,12 \times 10^{-7}$ | 0,865 |
| Areia | $1,72 \times 10^{-2}$ | 0,77 |

4.3.8) Curva Característica

As curvas características da argila e da areia foram determinadas pelo método do extrator de Richards, sendo os corpos de prova moldados nas mesmas condições iniciais descritas para o ensaio de permeabilidade saturada. O ensaio da curva característica da argila foi determinado por MENDONÇA (2004).

As figuras 4.21 e 4.22 apresentam os dados das curvas característica para as amostras de argila e areia, respectivamente. Sendo os ajuste das curvas obtidos pela proposição matemática de FREDLUND e XING (1994) apresentada na equação (4.2) descrita no item (4.2.7) deste capítulo

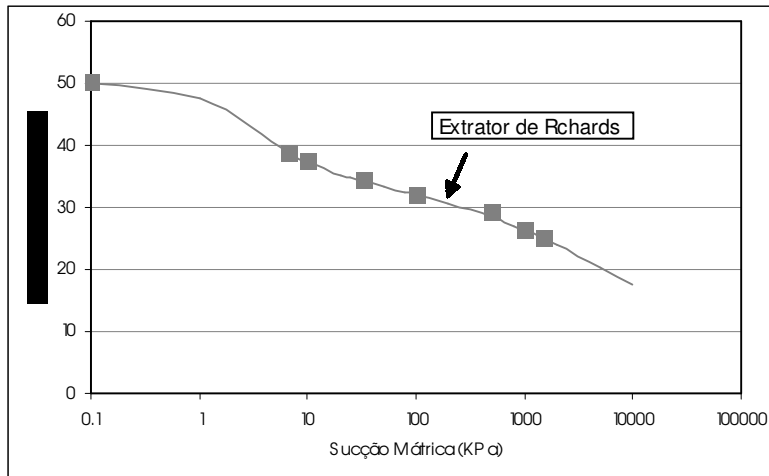


Figura 4-21 – Curva característica da argila.

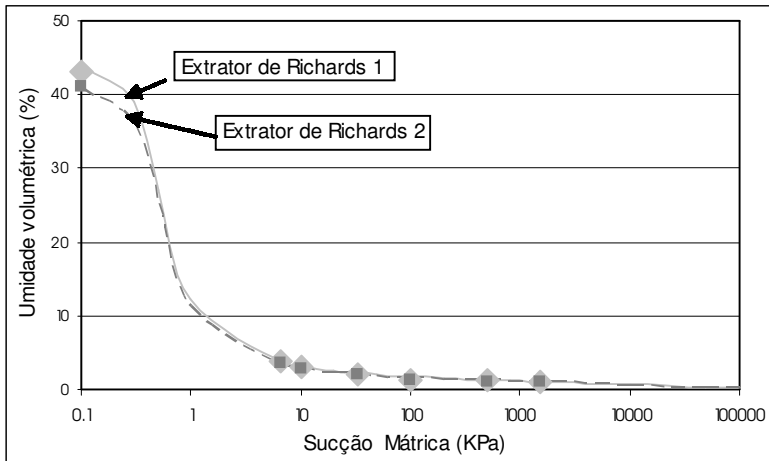


Figura 4-22 – Curvas características da areia.

Os parâmetros empíricos a , m e n da equação de FREDLUND e XING (1994) foram fornecidos pelo programa SOILCOVER. Os valores dos parâmetros empíricos a , m , e n , referentes às curvas apresentada nas figuras 4.21 e 4.22, assim como os valores de umidade volumétrica saturada, estão apresentados na tabela 4.24.

Tabela 4-24 – Parâmetros empíricos da equação de FREDLUND e XING (1994) e o valor da umidade volumétrica saturada das curvas características da argila e da areia.

| Curvas | | a | m | n | θ_{sat} (%) |
|--------|-----|------|-----|------|--------------------|
| Argila | ER | 1,81 | 0,2 | 2,62 | 50 |
| Areia | ER1 | 0,41 | 1,1 | 3,49 | 44 |
| | ER2 | 0,41 | 1,1 | 3,49 | 41 |

Na figura 4.22 pode-se verificar novamente a boa repetibilidade de dados entre as curvas características da areia realizadas em duplicata pelo método do extrator de Richards.

4.3.9) Permeabilidade Não Saturada

As curvas de permeabilidade não saturada *versus* sucção mátrica foram calculadas pelo programa SOILCOVER e são apresentadas nas figuras 4.23 e 4.24, para as amostras de argila e areia, respectivamente. O programa utiliza a equação de FREDLUND *et al.* (1994), para o cálculo da permeabilidade não saturada, equação (4.4) descrita no item (4.2.8) deste capítulo.

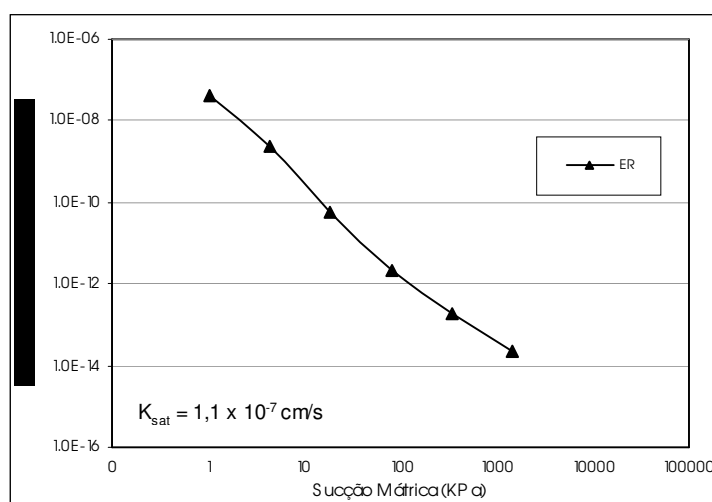


Figura 4-23 – Curvas de permeabilidade não saturada *versus* sucção mátrica calculada pelo programa SOILCOVER para argila.

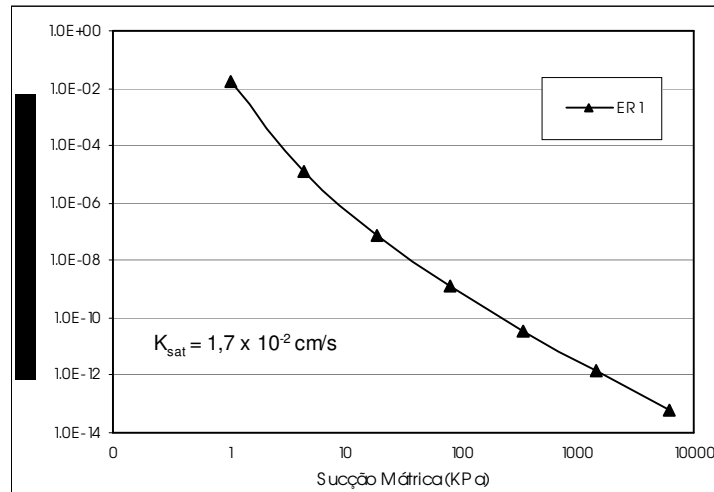


Figura 4-24 – Curvas de permeabilidade não saturada *versus* sucção mátrica calculada pelo programa SOILCOVER para areia.

4.4 – Comentários finais

Uma forma de analisar se dois materiais sobrepostos apresentam as características desejadas para um bom funcionamento como barreira capilar é através das curvas de permeabilidade não saturada. A figura 4.25 apresenta as curvas de permeabilidade não saturada *versus* sucção mátrica para as amostras de cinza de fundo, argila e areia.

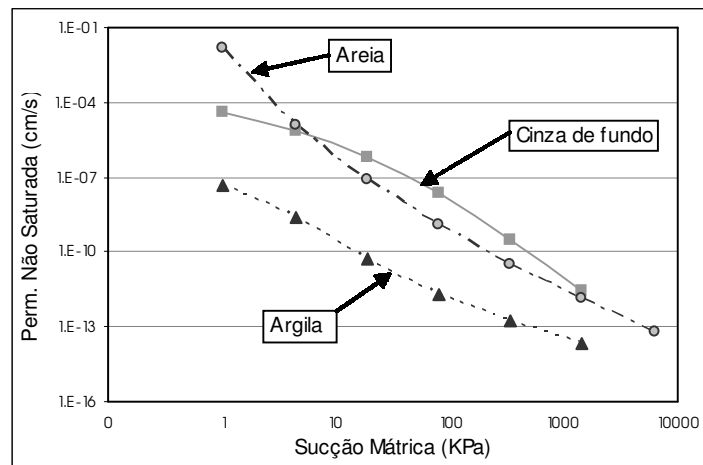


Figura 4-25 – Curvas de permeabilidade não saturada para cinza de fundo, argila Picollo e areia.

Segundo SHACKELFORD (1997) o efeito da barreira capilar ocorre quando a condutividade hidráulica não saturada da camada de material granular torna-se menor que a condutividade hidráulica não saturada da camada de material fino, com o aumento da sucção mátrica. Como pode ser observado na figura 4.25, a curva de permeabilidade não saturada do material granular (cinza de fundo ou areia) não intercepta a curva de permeabilidade não saturada do material fino (argila). Portanto, em relação à afirmativa acima e as curvas apresentadas na figura 4.25, pode-se afirmar que tanto a cinza de fundo como a areia não apresentam comportamento de barreira capilar quando sobrepostas por uma camada de argila Picollo.

Entretanto, uma outra forma de fazer a mesma análise é através das curvas de retenção solo-água. A figura 4.26 apresenta as curvas de retenção da cinza de fundo, da argila Picollo e da areia. Sendo que, os dados da cinza de fundo foram obtidos do ensaio do papel-filtro e os dados da areia e da argila foram obtidos pelo ensaio do extrator de Richards.

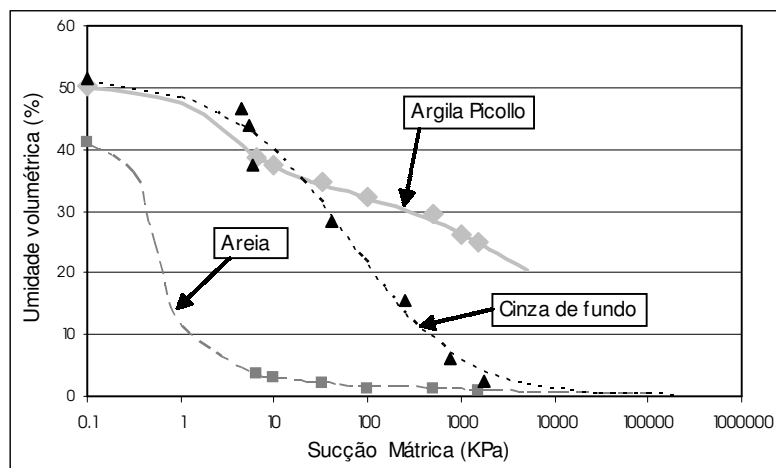


Figura 4-26– Curvas de retenção solo-água para a cinza de fundo, argila Picollo e areia.

O parâmetro analisado na referida figura é o valor de entrada de ar (AEV) ou sucção de entrada de ar, definido como o valor correspondente ao ponto em que a água presente nos poros maiores começa a sair. O AEV é determinado conforme apresentado na figura 2.4. Segundo O’KANE, et al. (2002) o AEV do material granular deve ser menor que o AEV do material argiloso. Com base nessa afirmativa e nas curvas apresentadas na

figura 4.26, tanto a cinza de fundo quanto a areia apresentariam um bom funcionamento como barreira capilar, quando sobreposta por uma camada de argila Picollo.

Capítulo 5 – Ensaio de evaporação

5.1) Introdução

Para análise do comportamento de coberturas simples (areia, cinza de fundo e argila) bem como de coberturas formadas por barreira capilar dupla (cinza de fundo – argila – cinza de fundo), foram realizados ensaios de evaporação ao ar. Para tanto, colunas de tubo de PVC contendo camadas desses materiais foram expostas ao ar, tendo-se monitorado a variação do peso das colunas ao longo de diferentes períodos de tempo.

O ensaio foi realizado no laboratório de geotecnia ambiental da COPPE/UFRJ. A perda de massa das colunas (equivalente à perda d'água por evaporação) foi determinada utilizando uma balança com precisão de uma casa decimal ($\pm 0,1g$). As condições ambientais (temperatura e umidade relativa do ar máxima e mínima) do laboratório foram medidas pelo aparelho apresentado na figura 5.1. A pesagem das colunas e as leituras das condições ambientais foram anotadas a cada 24 horas.

Três diferentes séries de ensaio foram realizadas, conforme apresentado a seguir.



Figura 5-1 – Aparelho utilizado para medir temperatura e umidade relativa do ar máxima e mínima.

5.2) Descrição e Resultados dos Ensaio

• Série 1 – Descrição

Na primeira série de ensaios, foram moldadas quatro colunas de acordo com a seguinte distribuição:

- 1 coluna simples de argila Picollo (CSAP-1)
- 1 coluna simples de cinza de fundo (CSCF-1)
- 1 coluna de água (CA-1)
- 2 colunas (duplicata) contendo três camadas de material formando uma barreira capilar dupla composta de cinza de fundo – argila – cinza de fundo (BCA-1 / BCB-1).

O desenho esquemático das colunas está apresentado na figura 5.2, com as dimensões e as propriedades (índice de vazios e teor de umidade gravimétrico inicial) com as quais os diferentes materiais foram moldados. A figura 5.3 apresenta uma foto com as colunas da primeira série dos ensaios de evaporação.

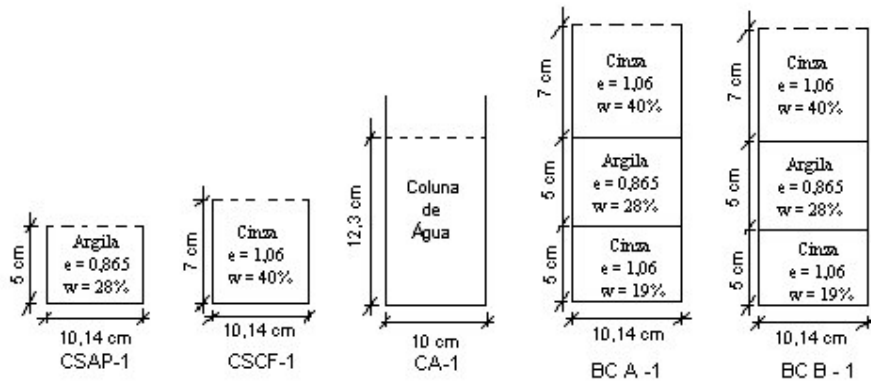


Figura 5-2 – Dimensões das colunas e propriedades geotécnicas dos materiais utilizados na 1ª série dos ensaios de evaporação.



Figura 5-3 – Foto das colunas da primeira etapa dos ensaios de evaporação.

As colunas foram moldadas com compactação estática, sendo as colunas de barreira capilar A e B compactadas em três camadas. Ao moldar as colunas, teve-se o cuidado de que a camada de cinza superior e a camada de argila das colunas de barreira capilar dupla (BCA-1 e BCB-1) tivessem as mesmas propriedades (índice de vazios e teor de umidade inicial) desses materiais nas colunas simples (CSAP-1 e CSCF-1).

A camada de argila foi compactada com uma umidade inicial de 28%, ou seja, umidade inicial acima da umidade ótima, porque segundo SHACKELFORD (1997), uma recomendação para projetos de cobertura, que tem como objetivo minimizar a drenagem ácida tem sido compactar o solo de granulometria fina com um teor de umidade gravimétrico acima da umidade ótima, para minimizar a permeabilidade saturada e diminuir a possibilidade de interconexão dos poros preenchidos por ar, diminuindo assim a difusão do oxigênio.

As colunas compostas de barreira capilar dupla (BCA-1 e BCB-1) foram construídas para serem desmontadas em tempos diferentes. Considerando o fato das referidas colunas serem idênticas, elas teriam que apresentar o mesmo comportamento em relação à perda de umidade, portanto, desmontar as colunas em dias diferentes permite o controle da evaporação de cada camada em um dia intermediário do ensaio. Nesta série, o controle da perda de umidade foi feito durante 29 dias para a barreira capilar dupla

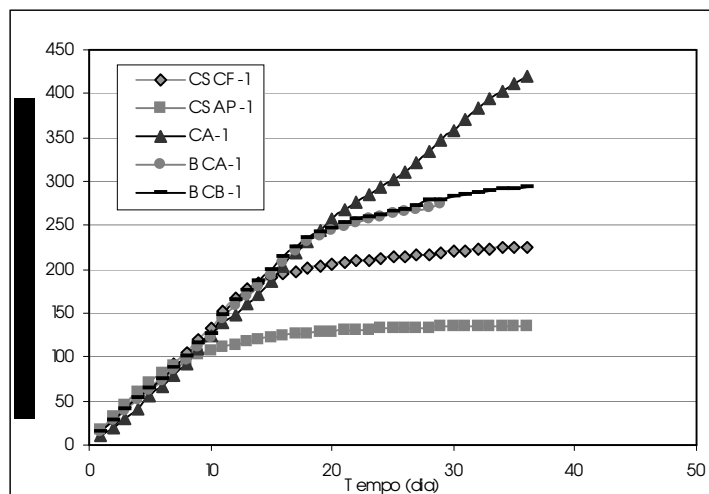
(BCA-1) e durante 36 dias para as demais colunas. A coluna composta somente por água (CA-1) foi construída com a finalidade de obter dados de evaporação potencial.

- **Série 1 – Resultados**

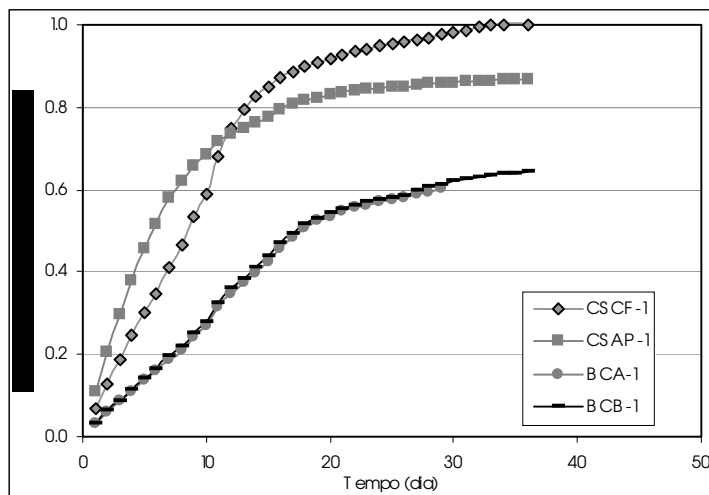
Os resultados da Série 1 estão apresentados nas figuras 5.4 a 5.7. Na figura 5.4(a) estão plotados os valores de massa de água evaporada acumulada *versus* tempo e na figura 5.4(b), os valores de massa de água evaporado acumulado dividido pela massa de água inicial *versus* tempo.

Observa-se, através da figura 5.4(a), que a coluna de água (CA-1) perde umidade (evapora) a uma taxa praticamente constante ao longo de todo o ensaio. As colunas contendo materiais de cobertura (BCA-1, BCB-1, CSCF-1, CSAP-1), por sua vez, mudam sensivelmente a taxa de evaporação ao longo do ensaio, definindo claramente duas etapas de evaporação. Na primeira etapa, fase na qual o material encontra-se com um teor de umidade elevado, a taxa de perda de água é praticamente igual à da coluna de água pura. Na segunda etapa, à medida que o material vai ficando mais seco, a taxa de evaporação torna-se muito mais lenta e é praticamente constante nos três tipos de cobertura. A diferença de comportamento entre as diferentes coberturas consiste no tempo que cada uma delas leva para mudar a taxa de evaporação.

Plotando os valores de massa de água evaporada em relação à massa de água inicial de cada coluna, figura 5.4(b), observa-se que, para a coluna de argila (CSAP-1), a mudança na taxa de evaporação ocorre quando o material perde cerca de 60% da massa inicial de água (7º dia do ensaio). Observa-se também que, após a camada de argila ter perdido cerca de 83% da massa inicial de água, não ocorre mais diminuição significativa de umidade com o passar do tempo. Para a coluna de cinza (CSCF-1), a taxa de evaporação diminui a partir do momento em que o material perde aproximadamente 80% da massa inicial de água (12º dia de ensaio). Após este dia, a coluna de cinza perde umidade mais lentamente, até que, ao final do ensaio, toda a água é evaporada. Fazendo uma comparação entre ambas as colunas, pode-se concluir que a taxa de evaporação da argila é inicialmente maior que a da cinza. Porém, a argila apresenta um teor de umidade residual mais elevado que a cinza.



(a)



(b)

Figura 5-4 – Ensaio de evaporação – Série 1: (a) relação de massa de água evaporada acumulada (g) *versus* tempo (dia) ; (b) relação de massa de água evaporada acumulado pela massa de água inicial *versus* tempo (dia).

As colunas de barreira capilar (BCA-1 e BCB-1) perdem umidade mais lentamente que as colunas de material simples. A taxa de evaporação destas colunas começa a diminuir quando cerca de 50% da massa de água inicial foi perdida. Como era esperado, ambas as colunas tiveram comportamento idêntico ao longo do ensaio. Ao final dos 36 dias de ensaio, a coluna de barreira capilar B (BCB-1) havia perdido aproximadamente 65% da massa inicial de água.

Ainda em relação à figura 5.4(a), deve ser observado que, nos primeiros dias de ensaio, a coluna de água pura perdeu menor quantidade de água que as demais colunas. Este comportamento contraria as definições de evaporação potencial e real, uma vez que a evaporação da água livre é definida como a máxima evaporação, considerando as mesmas condições climáticas e a mesma área transversal. A explicação para tal fato pode ter sido o uso de colunas diferentes para a água e para os demais materiais. Para a coluna de água foi usado um tubo de PVC de cor branca com espessura de 2mm. Já para as demais colunas foram utilizados tubos de PVC de cor preta com espessura de 5mm, para suportar a compactação dos materiais. É possível que o tubo de cor preta tenha absorvido mais calor do ambiente, fazendo com que os materiais no seu interior evaporassem mais rapidamente. Considerando que este fato não está relacionado ao comportamento dos materiais de cobertura em estudo, o valor da massa de água evaporada das colunas com solo ou cinza (usada no cálculo de evaporação) será considerado igual à massa de água evaporada da coluna de água toda vez que a massa de água destas colunas exceder a massa da coluna de água. Este procedimento foi adotado para todas as três séries de ensaio.

Na figura 5.5(a) estão apresentados os dados de evaporação *versus* tempo e na figura 5.5(b) os dados de evaporação real dividido pela evaporação potencial (ER/EP) *versus* tempo. A evaporação real (referente às colunas de solo ou cinza) e a evaporação potencial (referente à coluna de água) foram calculadas diariamente segundo a equação (5.1), considerando que a perda de massa das colunas é referente apenas à perda de água, e a massa específica da água é 10 KN/m³.

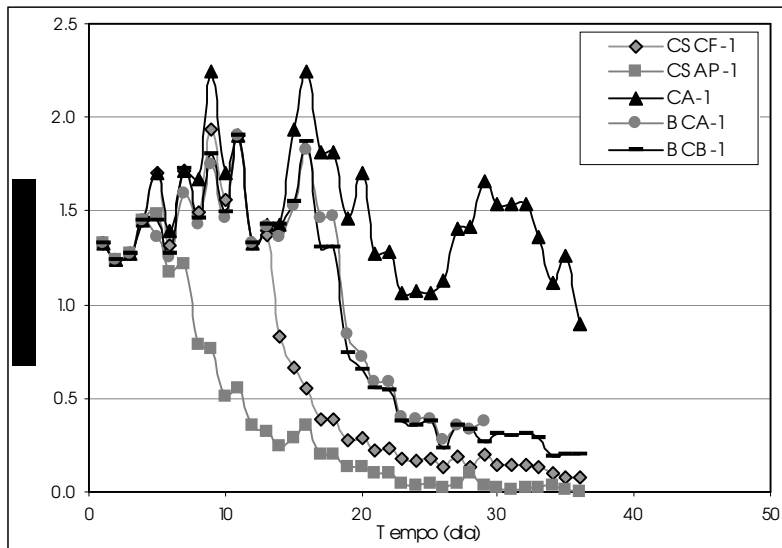
$$E = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (5.1)$$

Onde:

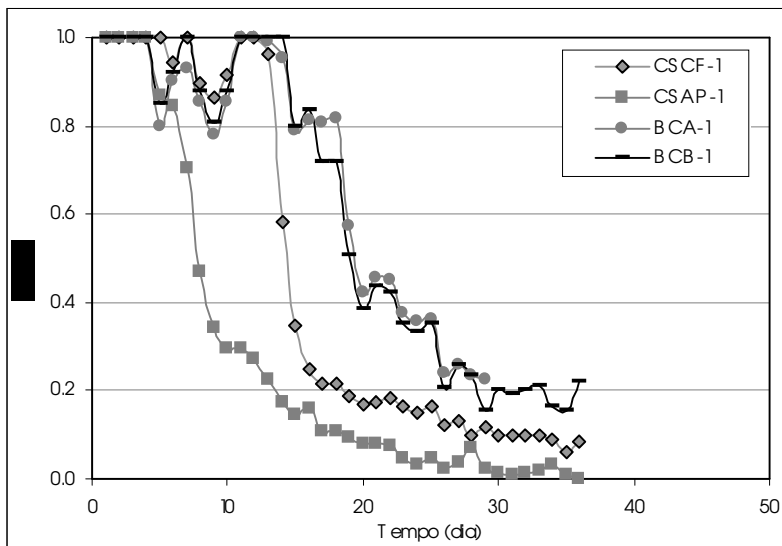
E= evaporação diária (mm/dia);

Δt = variação do tempo (dia);

Δh = variação da altura de água evaporada (mm)



(a)



(b)

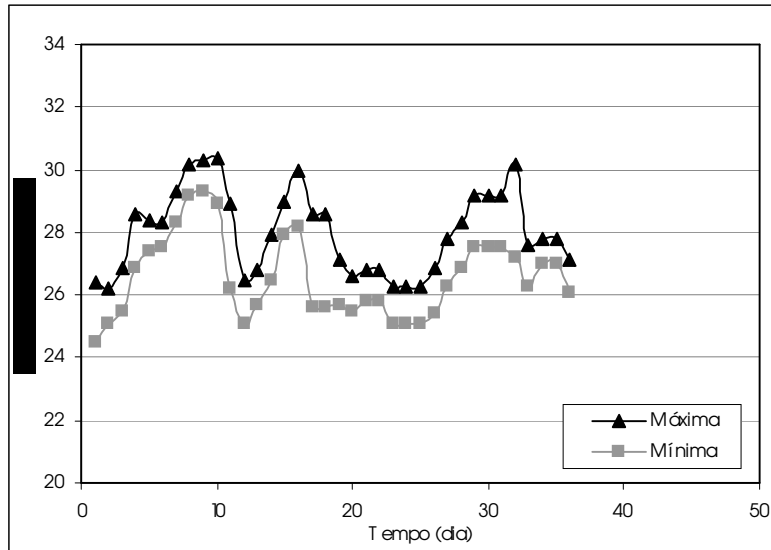
Figura 5-5 – Ensaio de evaporação – Série 1: (a) evaporação (mm/dia) versus tempo (dia) e (b) relação de evaporação real pela evaporação potencial versus tempo (dia).

As colunas preenchidas com material de cobertura apresentam o mesmo valor da evaporação da coluna de água quando estes materiais encontram-se no estado saturado ou próximo da saturação. À medida que o teor de umidade das amostras vai diminuindo, a tendência é que a evaporação real diminua em relação à evaporação potencial. A primeira coluna a diminuir a taxa de evaporação foi a coluna de argila, seguida da coluna de cinza de fundo e, por último, as colunas de barreira capilar dupla.

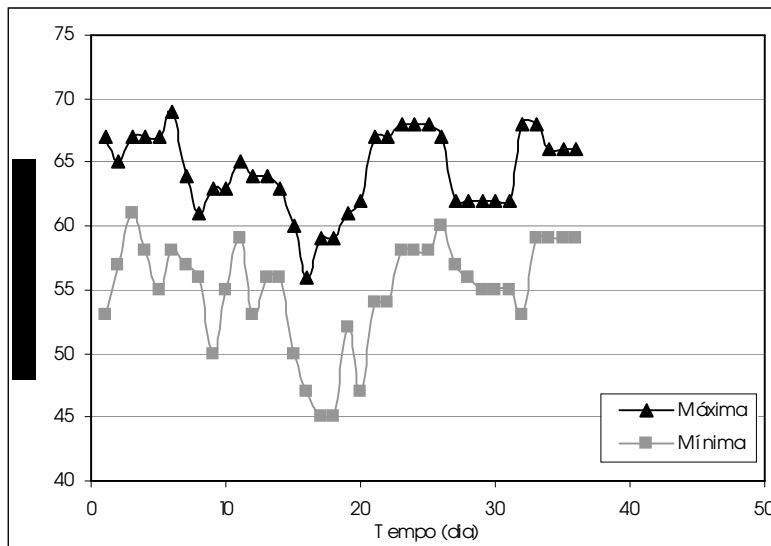
Observa-se na figura 5.5(a), que a evaporação da coluna de água (CA-1) apresentou oscilações no decorrer de todo o ensaio. Na figura 5.5(b) observa-se que as curvas referentes às colunas de cinza (CSCF-1) e de barreira capilar dupla (BCA-1 e BCB-1) também apresentaram oscilações na relação ER/EP, principalmente entre o 5º e o 15º dia de ensaio. Nas referências bibliográficas que apresentam gráficos semelhantes (OLIVEIRA *et al.*, 2004, WILSON *et al.*, 1997, WILSON *et al.*, 1994), não são observadas oscilações desse tipo. Avalia-se que esse comportamento seja devido às oscilações nas condições ambientais do laboratório, uma vez que a maioria dos ensaios de evaporação citados na literatura foram feitos em laboratório com temperatura controlada.

No presente estudo, as condições ambientais do laboratório não foram controladas, mas foram monitoradas ao longo de todo o ensaio. Na figura 5.6(a) apresentam-se os dados de temperatura do ar máxima e mínima *versus* tempo e, na figura 5.6(b), os dados de umidade relativa do ar máximo e mínimo *versus* tempo. Observa-se através destas figuras que a temperatura do ar variou entre 24,5°C e 31°C, e a umidade relativa do ar entre 45% e 71%. Esta primeira série de ensaios foi iniciada no final do mês de outubro e, por tratar-se de uma época do ano úmida, justifica os valores elevados para umidade relativa do ar obtidos durante o ensaio.

Conforme mencionado anteriormente, as colunas com barreira capilar dupla foram desmontadas em dias diferentes. A figura 5.7 apresenta o grau de saturação inicial e o grau de saturação nos 29º e 36º dias de ensaio, ao longo da profundidade das colunas. As profundidades escolhidas para determinar o teor de umidade foram: a cada cerca de 2cm para as camadas de cinza (superior e inferior) e a cada cerca de 1cm para a camada de argila. A tabela 5.1 apresenta os valores referentes à figura 5.7.



(a)



(b)

Figura 5-6 – Condições ambientais de laboratório – Série 1: (a) temperatura do ar (°C) *versus* tempo (dia) e (b) umidade relativa do ar (%) *versus* tempo (dia).

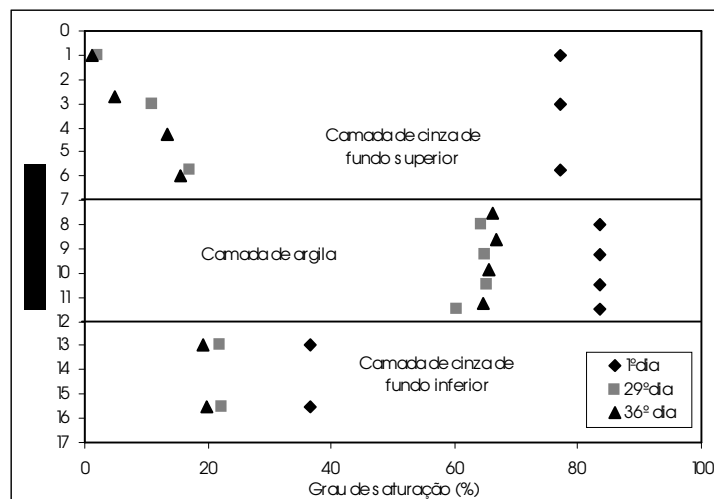


Figura 5-7 – Valores de grau de saturação ao longo da profundidade das colunas de barreira capilar dupla da primeira série dos ensaios de evaporação.

Tabela 5-1 – Valores referentes aos apresentados na figura 5.7.

| camada | S ₀ (%) | S ₂₉ (%) | Red. S ₂₉ (%) | S ₃₆ (%) | Red. S ₃₆ (%) |
|-------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Cinza de fundo superior | 77,3 | 10,0 | 87,0 | 8,8 | 88,7 |
| Argila | 83,5 | 64,8 | 22,42 | 66,4 | 20,5 |
| Cinza de fundo inferior | 36,6 | 22,1 | 39,6 | 19,6 | 47,4 |

S_x é o valor do grau de saturação no dia x e Red. S_x é a redução do valor do grau de saturação da referida camada até o dia x.

Com relação à figura 5.7 e a tabela 5.1, observa-se que, em 29 dias de ensaio, o grau de saturação da camada de argila teve uma redução de 22,4% em relação ao valor inicial da referida camada. Para a camada superior de cinza, a redução do grau de saturação foi de 87,0%, em média. Em relação à camada inferior de cinza à redução foi de 39,6%. No entanto, quase não houve variação significativa dos valores de grau de saturação entre os 29º e 36º dias de ensaio, com exceção da camada inferior de cinza de fundo, que no 36º dia de ensaio teve uma redução de 7,8% em relação ao valor do grau de saturação do 29º dia. Vale ressaltar que o último dado da camada de argila encontra-se na interface entre as camadas de argila e cinza, portanto, o valor do grau de saturação neste ponto não deve ser levado em consideração.

Analisando todos os resultados da primeira série de ensaios, pode-se observar que, em 36 dias de ensaio a coluna simples de argila (CSA-1) perdeu 87% da sua massa de água inicial, enquanto que a camada de argila que compõem a coluna de barreira capilar B (BCB-1) perdeu apenas 20% da sua massa de água inicial, sendo que as duas camadas foram moldadas com as mesmas dimensões e mesmas propriedades. Fazendo uma comparação semelhante para a camada superior de cinza da barreira capilar B, percebe-se que a perda de massa de água inicial foi de aproximadamente 90%, enquanto que na coluna simples de cinza, a perda foi de 100%. Com base nestes dados, pode-se concluir que, para a camada de cinza superior, da coluna de barreira capilar, a variação de comportamento não foi muito significativa em relação à camada simples de cinza, enquanto que para a camada de argila, a mudança de comportamento foi significativa. Isso implica que um sistema de cobertura composto por uma camada de argila entre duas camadas de cinza de fundo funciona como um sistema de barreira capilar.

- **Série 2 – Descrição**

Ao final da primeira série dos ensaios, observou-se que os dias escolhidos para interrupção dos ensaios não tinham sido satisfatórios, visto que aos 29 dias de ensaio, as colunas compostas pela barreira capilar dupla já haviam perdido considerável quantidade de água nas três camadas. Portanto, para determinar o perfil de umidade das colunas nos primeiros dias de ensaio, optou-se por fazer a segunda série dos ensaios, composta por:

- 4 colunas idênticas de barreira capilar (BCA-2, BCB-2, BCC-2 e BCD-2)
- 1 coluna de água pura (CA-2)

Na figura 5.8 está apresentado o desenho esquemático das colunas dessa segunda série dos ensaios, com as dimensões das colunas e as propriedades (índice de vazios e teor de umidade gravimétrico inicial) com as quais as diferentes camadas foram moldadas.

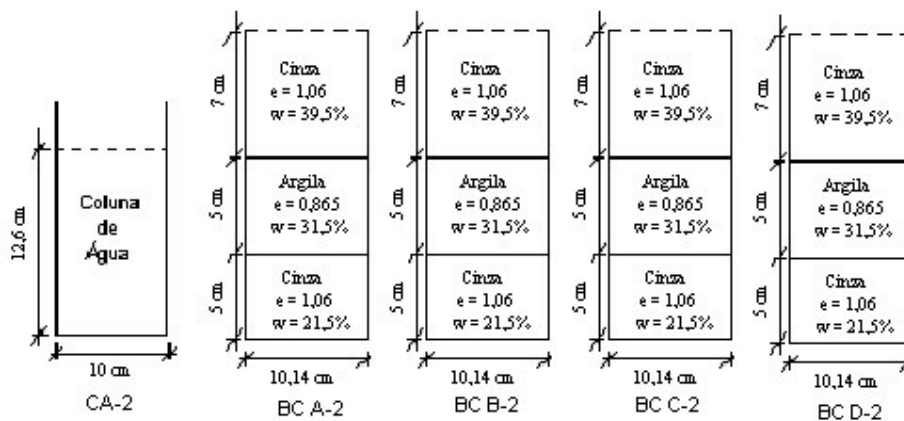


Figura 5-8 – Dimensões das colunas e propriedades geotécnicas dos materiais utilizados na 2ª série dos ensaios de evaporação.

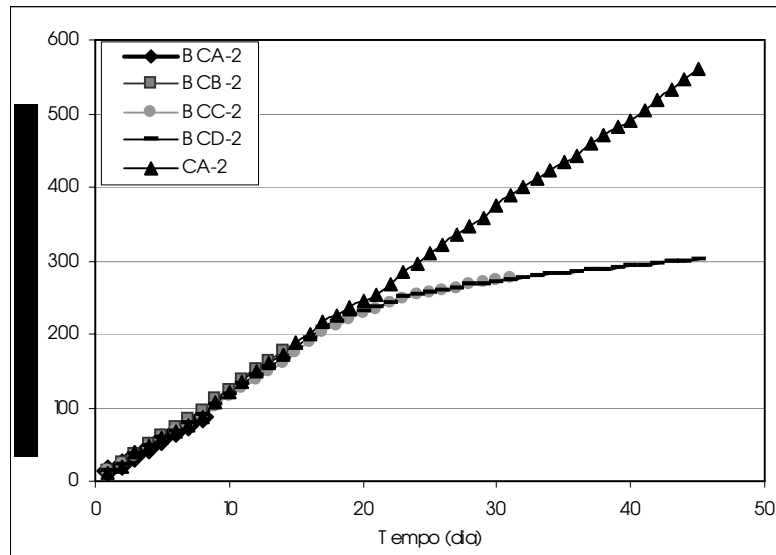
As colunas de barreira capilar da segunda série dos ensaios (BCA-2, BCB-2, BCC-2 e BCD-2) teriam os mesmos teores de umidade inicial das colunas de barreira capilar da primeira série dos ensaios (BCA-1 e BCB-1), entretanto, como um dos objetivos da barreira capilar é manter o grau de saturação da camada de argila elevado, optou-se por aumentar o teor de umidade gravimétrica inicial da camada de argila de 28% para 31,5%, mas mantendo o mesmo índice de vazios. A camada de cinza de fundo inferior também teve o seu teor de umidade gravimétrica inicial aumentado de 19% para 21,5%. Assim como na série de ensaios anteriores, a coluna de água pura teve a finalidade de determinar a evaporação potencial.

- **Série 2 – Resultados**

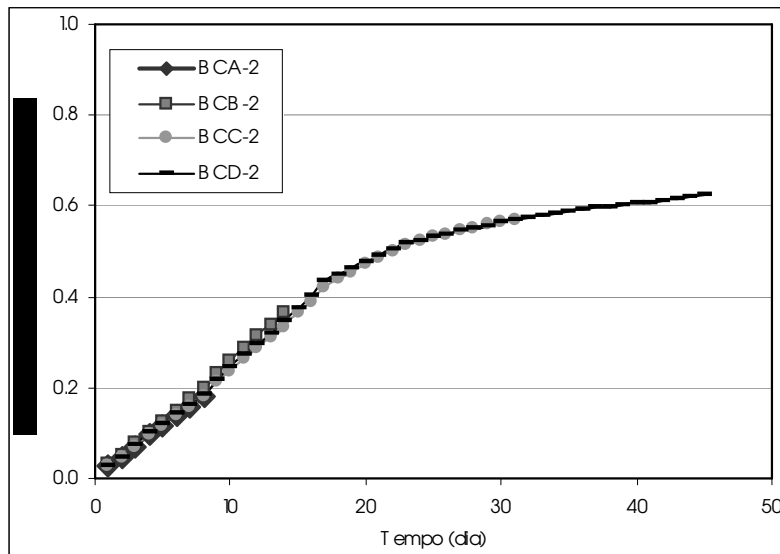
Os resultados obtidos na segunda série dos ensaios estão apresentados nas figuras 5.9 a 5.12. Na figura 5.9(a) estão apresentados os valores de massa de água evaporada acumulada *versus* tempo e na figura 5.9(b) os valores de massa de água evaporada acumulada dividido pela massa de água inicial *versus* tempo.

Analisando os resultados apresentados na figura 5.9(a) e 5.9(b), pode-se observar que as quatro colunas apresentam comportamentos idênticos em relação à evaporação, como era de se esperar. Quanto à mudança na taxa de evaporação, ela ocorreu no 22º dia de ensaio, tendo perdido cerca de 50% da massa inicial de água. Ao final dos 45 dias de

ensaio, a coluna de barreira capilar D (BCD-2) havia perdido aproximadamente 62% da massa inicial de água.



(a)

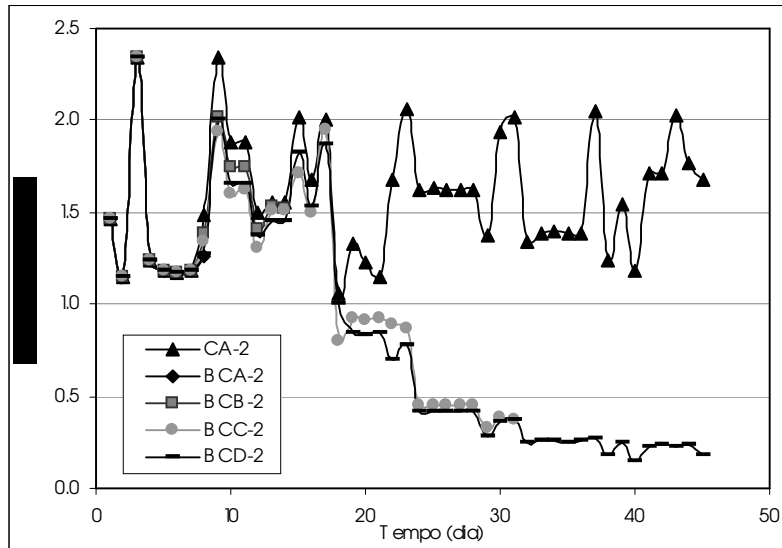


(b)

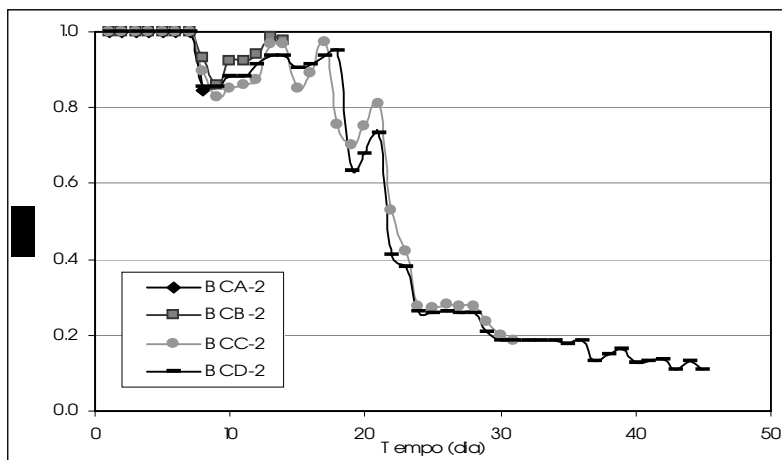
Figura 5-9 – Ensaio de evaporação – Série 2: (a) relação de massa de água evaporada acumulada (g) *versus* tempo (dia); (b) relação de massa de água evaporada acumulada pela massa de água inicial *versus* tempo (dia).

Na figura 5.10(a) estão plotados os dados de evaporação *versus* tempo e na figura 5.10(b) os dados de evaporação real pela evaporação potencial (ER/EP) *versus* tempo.

Em relação às referidas figuras, pode ser observado que: a relação diária de ER/EP sofre oscilações ao longo do ensaio. Este fato é possivelmente decorrente das oscilações nas condições ambientais do laboratório.



(a)

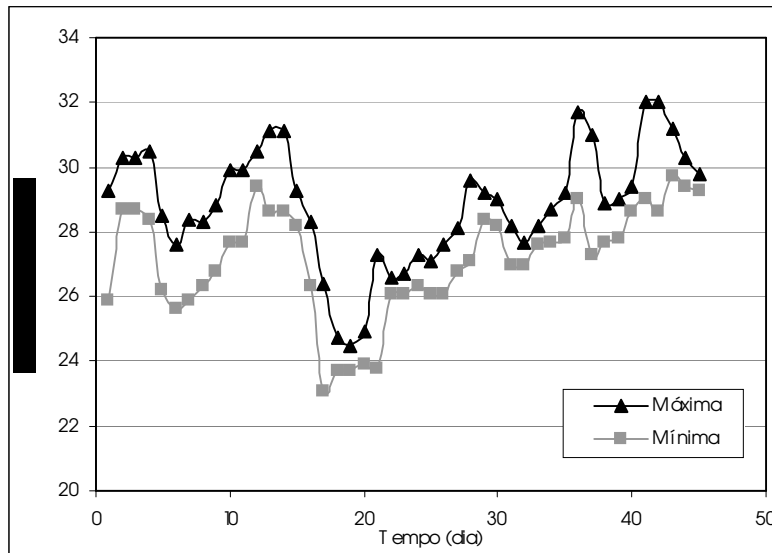


(b)

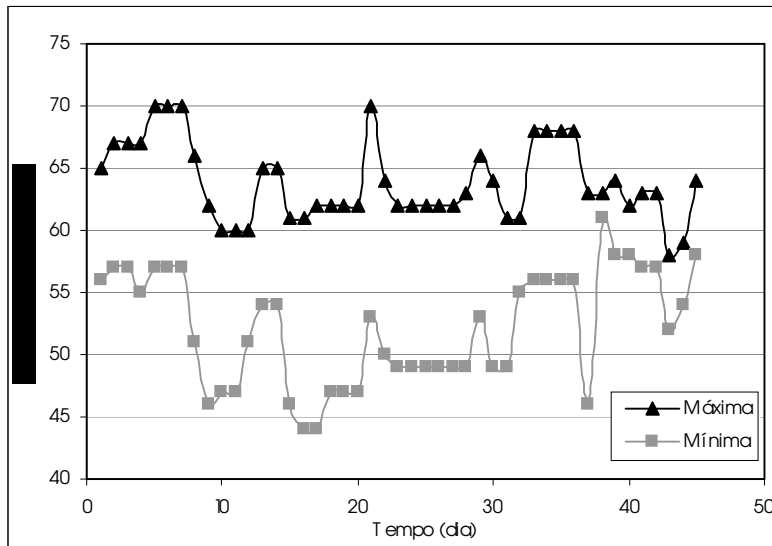
Figura 5-10 – Ensaio de evaporação – Série 3: (a) evaporação (mm/dia) *versus* tempo (dia) e (b) relação de evaporação real pela evaporação potencial *versus* tempo (dia).

Na figura 5.11(a) apresentam-se os dados de temperatura do ar máxima e mínima *versus* tempo e, na figura 5.11(b), os dados de umidade relativa do ar máxima e mínima *versus* tempo, ambas referentes a 2ª série dos ensaios de evaporação. Esta série de ensaios teve início no começo no mês de dezembro e pode-se observar, nesse período,

uma considerável variação na temperatura do ar (entre 23°C e 32°C) e na umidade relativa do ar (entre 44% e 70%).



(a)



(b)

Figura 5-11 – Condições ambientais de laboratório – Série 2: (a) temperatura do ar (°C) *versus* tempo (dia) e (b) umidade relativa do ar (%) *versus* tempo (dia).

Na figura 5.12 estão plotados os valores do grau de saturação para a condição inicial e do grau de saturação para os 8°, 14°, 31° e 45° dias do ensaio, ao longo da profundidade. As profundidades escolhidas para determinar o teor de umidade foram

aproximadamente: a cada 1,5cm para as camadas de cinza (superior e inferior) e a cada 1cm para a camada de argila. A tabela 5.2 apresenta os valores referentes à figura 5.12.

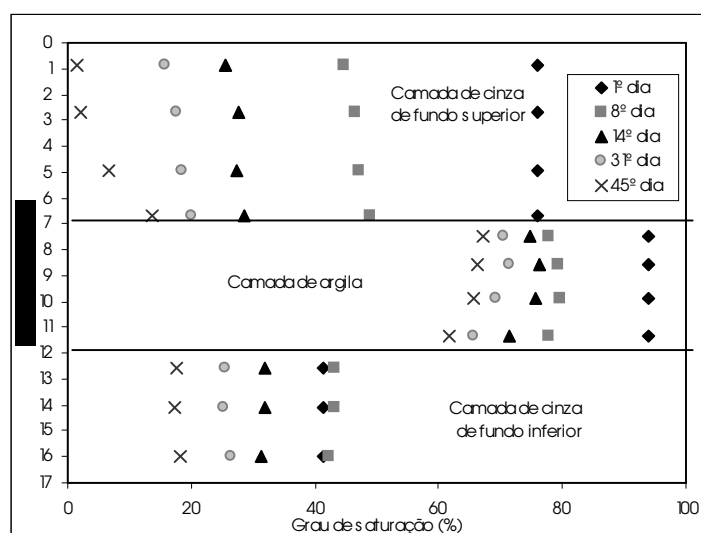


Figura 5-12 – Valores de grau de saturação ao longo da profundidade das colunas de barreira capilar dupla da segunda série dos ensaios de evaporação.

Tabela 5-2 – Valores referentes aos apresentados na figura 5.12.

| Camada | S_0 (%) | S_8 (%) | Red. S_8 (%) | S_{14} (%) | Red. S_{14} (%) | S_{31} (%) | Red. S_{31} (%) | S_{45} (%) | Red. S_{45} (%) |
|----------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| Cinza Superior | 76,0 | 46,8 | 38,4 | 27,3 | 64,0 | 18,08 | 76,2 | 6,0 | 92,1 |
| Argila | 94,0 | 78,9 | 16,0 | 75,6 | 19,6 | 70,4 | 25,1 | 66,5 | 29,2 |
| Cinza Inferior | 41,4 | 42,9 | - | 31,8 | 23,1 | 25,8 | 37,7 | 17,7 | 57,2 |

S_x é o valor do grau de saturação no dia x e Red. S_x é a redução do valor do grau de saturação no dia x, em relação ao grau de saturação inicial.

Em relação aos resultados apresentados na figura 5.12 e na tabela 5.2, observa-se que a camada de argila reduz 16% o valor do grau de saturação até o 8º dia e outros 13,2% até o 45º dia de ensaio. Pode-se concluir daí que a camada de argila, após perder uma grande quantidade de água nos primeiros dias, apresenta uma maior capacidade de retenção de água. Lembrando que o último dado da camada de argila é referente à

interface entre as camadas de argila e cinza, portanto, o valor do grau de saturação deste ponto não deve ser levado em consideração.

Com relação às camadas de cinza, observa-se que a camada superior perdeu, em média, 92% do valor do grau de saturação no último dia de ensaio, e que a camada inferior perdeu 57%.

Em relação aos resultados apresentados na 1ª e na 2ª série dos ensaios, um comportamento comum a ambos os ensaios é o fato de que a utilização da cinza sobre a camada argilosa reduz consideravelmente a taxa de evaporação da camada de argila em comparação com uma barreira composta somente com argila. Observa-se no entanto que, embora as colunas apresentem comportamento de barreira capilar, a redução na taxa de perda de umidade da camada argilosa não é suficiente para que uma cobertura nesses moldes funcione como uma barreira ao fluxo de oxigênio. Isso ocorre devido ao fato de que, para que uma barreira argilosa seja efetiva contra a difusão do oxigênio, ela deve manter um grau de saturação variando entre 85% e 95% (YANFUL, 1993). Vale ressaltar que estas colunas foram expostas a condições apenas de evaporação e que em campo estariam sujeitas tanto à evaporação quanto a precipitação.

- **Série 3 – Descrição**

Através da primeira série dos ensaios observou-se que o fato das colunas de cinza de fundo e argila não serem da mesma altura dificultava uma comparação entre elas. Na terceira série de ensaios foram então moldadas três colunas simples com a mesma altura, com os seguintes materiais:

- 1 coluna simples de argila Picollo (CSAP-3)
- 1 coluna simples de cinza de fundo (CSCF-3)
- 1 coluna simples de areia (CSA-3)

O objetivo da terceira etapa consiste, portanto, em verificar o comportamento de três materiais diferentes em relação à componente evaporativa. Como esta etapa dos ensaios

começou poucos dias após o início da segunda série dos ensaios, a coluna de água utilizada para fornecer valores de evaporação potencial foi a mesma para as duas etapas.

A Figura 5.13 apresenta o desenho esquemático das colunas, com as dimensões e as propriedades geotécnicas (índice de vazios e teor de umidade gravimétrico inicial) com as quais os diferentes materiais foram moldados.

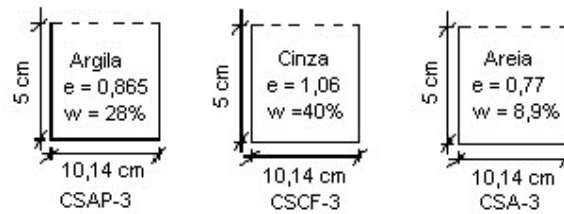


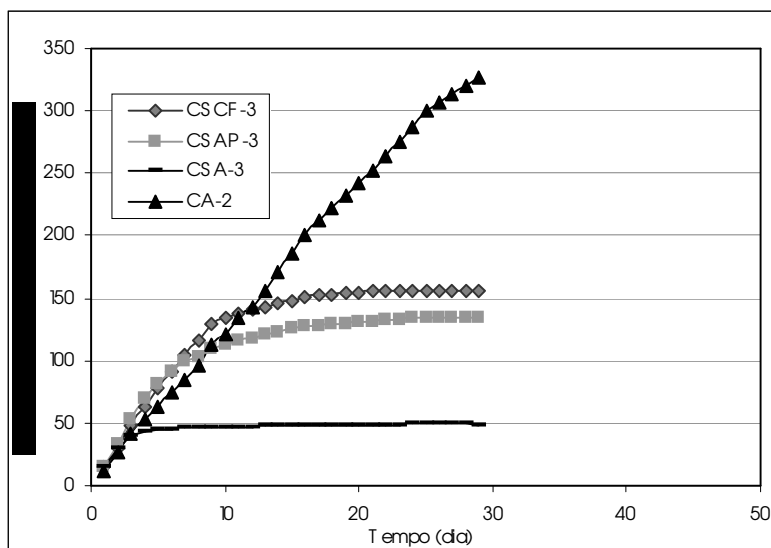
Figura 5-13 – Dimensões das colunas e propriedades geotécnicas dos materiais utilizados na 3ª série dos ensaios de evaporação.

O teor de umidade gravimétrico inicial para a coluna de areia foi de 8,9%. Esse valor é relativamente baixo devido às características granulométricas do material. Por tratar-se de uma areia muito grossa, não se consegue moldá-la com um teor de umidade maior.

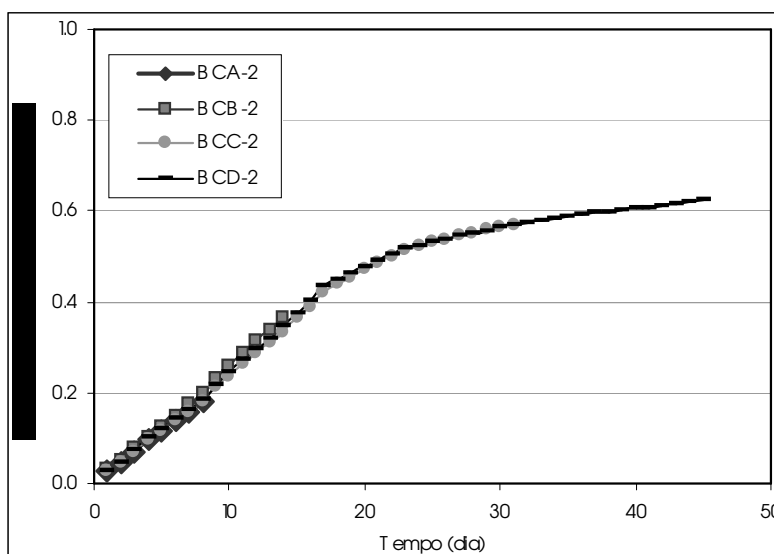
- **Série 3 – Resultados**

Os resultados obtidos na terceira série dos ensaios estão apresentados nas figuras 5.14 a 5.16. Na figura 5.14(a) estão apresentados os valores de massa de água evaporada acumulada *versus* tempo e na figura 5.14(b) os valores de massa de água evaporada acumulado dividido pela massa de água inicial *versus* tempo.

Em relação à figura 5.14(a) e 5.14(b), observa-se que o comportamento das colunas de argila e cinza de fundo foram semelhantes aos descritos na primeira série dos ensaios. A coluna de areia apresentou uma taxa de perda de água extremamente elevada nos três primeiros dias de ensaio perdendo, neste período, cerca de 80% da massa inicial de água. Este comportamento deve-se ao fato de que a areia estudada é muito grossa e exibe praticamente nenhuma capacidade de retenção de umidade.



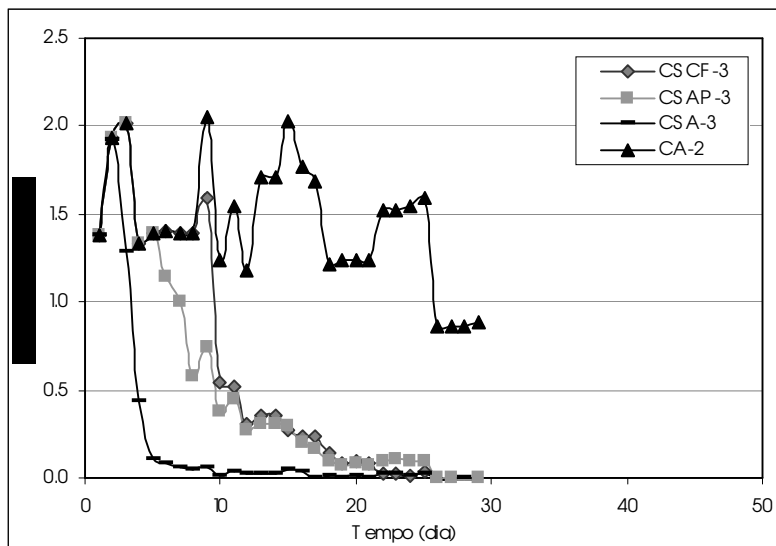
(a)



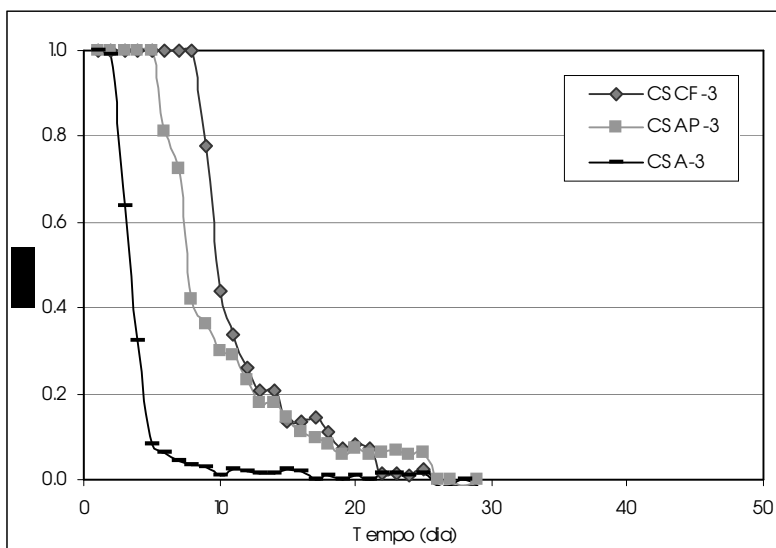
(b)

Figura 5-14 – Ensaio de evaporação – Série 3: (a) relação de massa de água evaporada acumulada (g) *versus* tempo (dia); (b) relação de massa de água evaporada acumulada pela massa de água inicial *versus* tempo (dia).

Na figura 5.15(a) estão plotados os dados de evaporação *versus* tempo e na figura 5.15(b) os dados de evaporação real pela evaporação potencial (ER/EP) *versus* tempo.



(a)

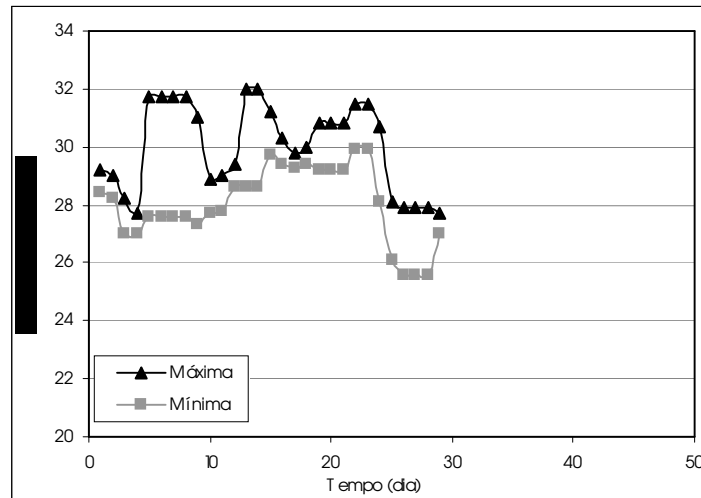


(b)

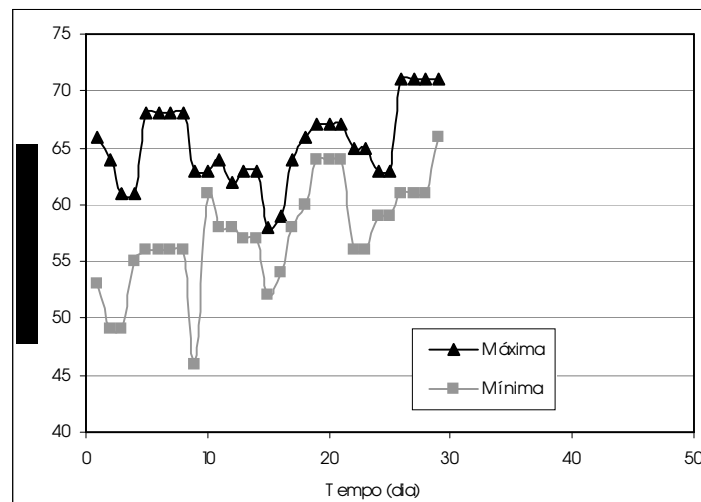
Figura 5-15 – Ensaio de evaporação – Série 3: (a) evaporação (mm/dia) *versus* tempo (dia) e (b) relação de evaporação real pela evaporação potencial *versus* tempo (dia).

Em relação à figura 5.15(a) e 5.15(b) observa-se, novamente, que a coluna de areia (CSA-3) evapora muito mais rápido que as colunas de cinza de fundo (CScF-3) e de argila Picollo (CSAP-3). Devido, não somente ao baixo teor de umidade inicial com que a areia foi moldada, como pelo fato da areia estudada apresentar uma granulometria de areia grossa.

Em relação à variação das condições climáticas do laboratório, referentes à terceira série de ensaios, a figura 5.14(a) apresenta os dados de temperatura do ar máxima e mínima *versus* tempo e a figura 5.14(b) os dados de umidade relativa do ar máxima e mínima *versus* tempo.



(a)



(b)

Figura 5-16 – Condições ambientais de laboratório – Série 3: (a) temperatura do ar (°C) *versus* tempo (dia) e (b) umidade relativa do ar (%) *versus* tempo (dia).

Em relação à figura 5.16, observa-se que a temperatura do ar variou entre 25,6°C e 32°C, e a umidade relativa do ar entre 46% e 71%. A terceira série de ensaios teve início no começo do mês de janeiro.

5.3) Comentários finais

Com base nos resultados descritos ao longo deste capítulo, foram feitas as seguintes conclusões:

- A camada de argila sozinha evapora mais rapidamente que a camada de argila colocada entre duas camadas de cinza de fundo, o que demonstra que a utilização dos dois materiais em conjunto pode funcionar como barreira capilar;
- A areia em estudo, por ser muito grossa, evapora mais rapidamente que a cinza de fundo. Nessas circunstâncias, a cinza de fundo poderia se apresentar como alternativa mais interessante para uso na barreira capilar;
- Embora tenha se observado que a cinza de fundo atua no sentido de diminuir a taxa de evaporação da argila (barreira capilar), essa redução não seria suficiente para controlar o fluxo de oxigênio para dentro da camada de resíduos, nas condições de secagem do ensaio. Entretanto, vale ressaltar que, nas condições de campo a cobertura também fica sujeita ao processo de precipitação, que não foi levada em consideração no ensaio de coluna.

Capítulo 6 – Simulações do SOILCOVER

6.1) Introdução

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).

No presente trabalho realizaram-se dois tipos de simulações com o programa SOILCOVER:

- Simulação de um dos ensaios de evaporação descrito no capítulo anterior, com o objetivo de comparar os resultados do ensaio com os obtidos pelo modelo;
- Simulações com dados climáticos de campo, para verificação do desempenho de coberturas simples e compostas de barreira capilar dupla.

6.2) Dados de entrada do modelo

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 ao qual o sistema fica exposto. O programa permite simular também condições de uso de vegetação, ocorrência de gelo e degelo e difusão do oxigênio. Essas análises, no entanto, não foram realizadas no presente estudo.

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.

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). Nesse método para geração dos dados de condutividade térmica *versus* teor de umidade gravimétrico, 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 as equações 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 detalhada ou simplificada. 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.

6.3) Simulação do ensaio de evaporação

A comparação entre os resultados obtidos do ensaio de evaporação com o programa SOILCOVER foi feita nas colunas de barreira capilar referentes à segunda série dos ensaios. Este ensaio foi escolhido por apresentar o perfil do grau de saturação em dias intermediários do ensaio o que permite uma comparação direta com os resultados do SOILCOVER.

Para esta simulação foi gerado um sistema de malhas com as dimensões apresentadas na figura 6.1, onde são apresentados também os teores de umidade gravimétrico inicial de cada camada. As propriedades dos materiais utilizados nesta simulação estão apresentadas na tabela 6.1 e na figura 6.2. As propriedades apresentadas na tabela 6.1 referem-se aos resultados dos ensaios de caracterização dos materiais, com exceção dos valores de percentagem de quartzo da amostra (Q) e calor específico (C_m) que foram utilizados os valores sugeridos pelo GEO-ANALYSIS 2000 LTD. (2000), por serem

considerados parâmetros com pouca influência nas simulações e dos valores de permeabilidade não saturada, onde foram usados os dados gerados pelo próprio programa, que utiliza a equação de FREDLUND *et al.* (1994).

Os dados das curvas características apresentadas na figura 6.2 foram obtidos pelos seguintes métodos: método do papel filtro para a amostra de cinza de fundo e método do extrator de Richards para a amostra de argila Picollo. Os ajustes das curvas características foram obtidos pela equação de FREDLUND e XING (1994).

Dentre os parâmetros avaliados (dados da curva característica, coeficiente de variação volumétrica e condutividade hidráulica saturada) na análise de sensibilidade apresentada em anexo, verificou-se que os parâmetros que apresentaram maior influência nas simulações do ensaio de evaporação foram os dados da curva característica e da permeabilidade saturada.

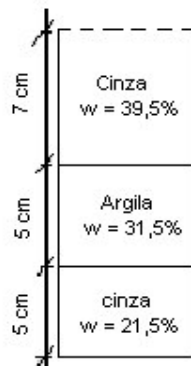


Figura 6-1 – Desenho esquemático da simulação do ensaio de evaporação.

Tabela 6-1 – Propriedades dos materiais usados na simulação do ensaio de evaporação.

| Material | ζ | G_s | K_{sat} (cm/s) | M_v (1/KPa) | Q (%) | C_m (J/Kg.C) |
|----------------|---------|-------|-----------------------|-----------------------|-------|----------------|
| Argila Picollo | 0,464 | 2,581 | $1,12 \times 10^{-7}$ | $4,2 \times 10^{-4}$ | 70 | 750 |
| Cinza de fundo | 0,515 | 2,043 | $2,45 \times 10^{-4}$ | $6,44 \times 10^{-4}$ | 100 | 850 |

Obs. ζ é a porosidade; G_s é a densidade real dos grãos; K_{sat} é a permeabilidade saturada; M_v é o coeficiente de variação volumétrica; Q é a porcentagem de quartzo da amostra e C_m é o calor específico.

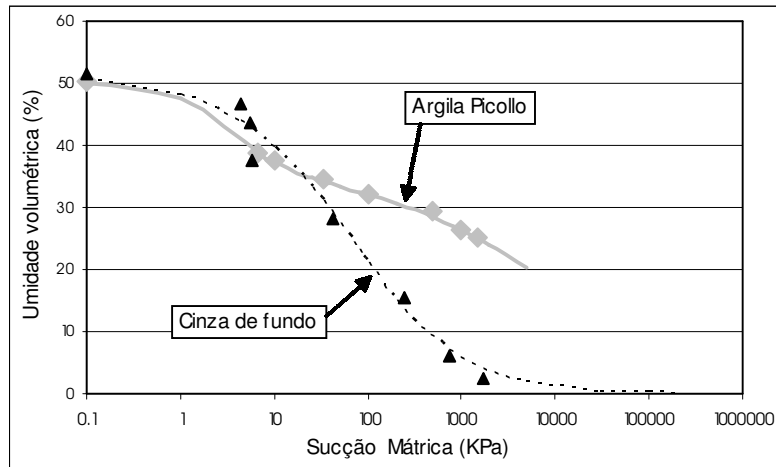
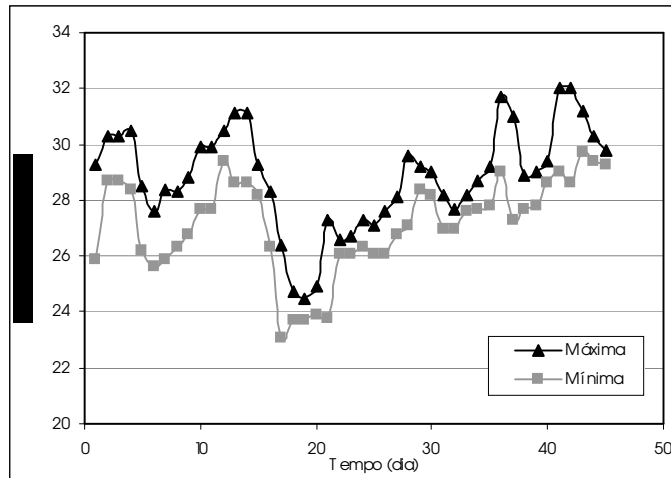


Figura 6-2 – Dados das curvas de retenção das amostras de cinza de fundo e argila Piccolo.

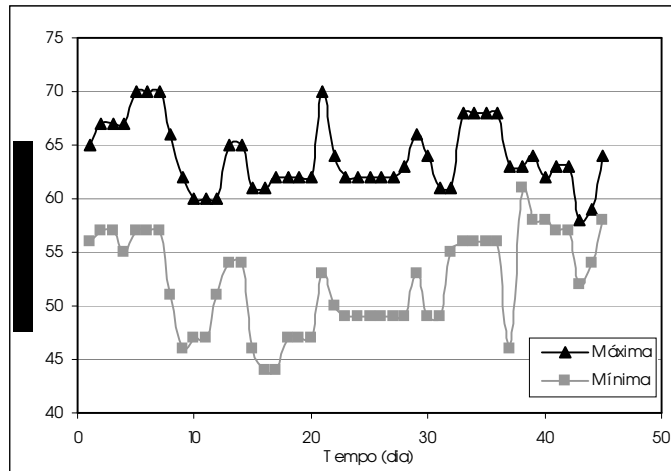
As condições de contorno do sistema de malhas utilizadas nesta simulação foram precipitação zero na superfície e teor de umidade gravimétrico na base. Como só foi possível obter os valores de teor de umidade na base das colunas para quatro dias intermediários (figura 5.12), para os demais dias de ensaio foi feita uma aproximação variando linearmente estes valores.

As condições ambientais estão apresentadas na figura 6.3 e são referentes aos dados ambientais de laboratório durante a realização do referido ensaio.

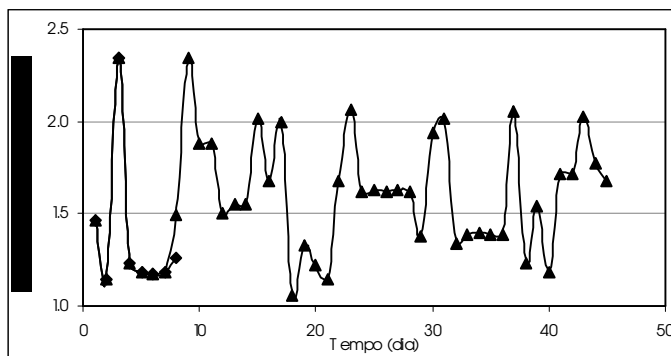
As comparações entre os resultados obtidos na 2ª série dos ensaios de evaporação e nas simulações estão apresentadas nas figuras 6.4 e 6.5. Na figura 6.4 apresenta-se um perfil de grau de saturação *versus* profundidade das colunas, os valores obtidos no ensaio estão apresentados por pontos e os valores computados pelo programa estão representados por linhas. Em relação às camadas de cinza de fundo da referida figura, observa-se uma boa relação entre os dados do ensaio e os dados fornecidos pelo programa. Entretanto, para camada de argila houve uma grande diferença entre os dados de ensaio e os resultados da simulação. De acordo com a análise de sensibilidade do programa apresentada em anexo, os resultados das simulações referentes à camada de argila não apresentaram uma boa correlação com os dados do ensaio, possivelmente porque os dados de entrada do programa – referentes à permeabilidade saturada e curva característica da argila – não representam a condição inicial da coluna de evaporação.



(a)



(b)



(c)

Figura 6-3 – Dados de laboratório utilizados na simulação, (a) temperatura máxima e mínima (°C), (b) umidade relativa do ar máxima e mínima (%) e (c) evaporação potencial (mm/dia).

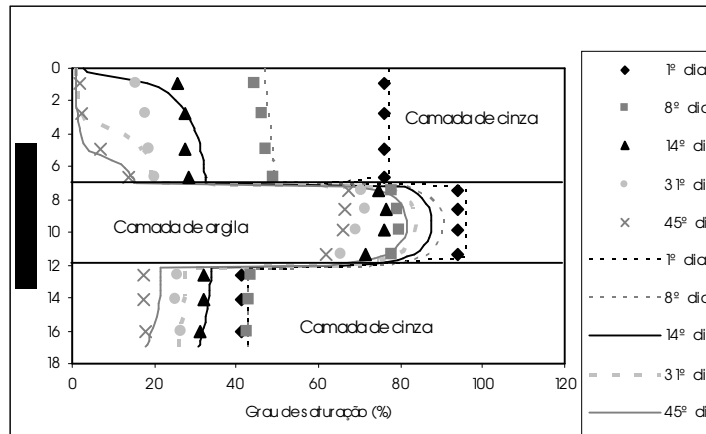


Figura 6-4 – Comparação entre os resultados obtidos no ensaio de evaporação e na simulação do programa SOILCOVER.

A figura 6.5 apresenta os valores de evaporação real *versus* tempo. Os dados de evaporação real referente ao ensaio foram calculados através de uma equação que leva em consideração apenas à perda de massa de água evaporada diariamente, como mostra a equação 5.1. Os dados referentes ao programa SOILCOVER foram calculados através da equação de Penman modificada por WILSON (1990), citado em WILSON *et al.* (1994), como mostra a equação 2.12, baseada nas condições climáticas a qual o sistema fica exposto.

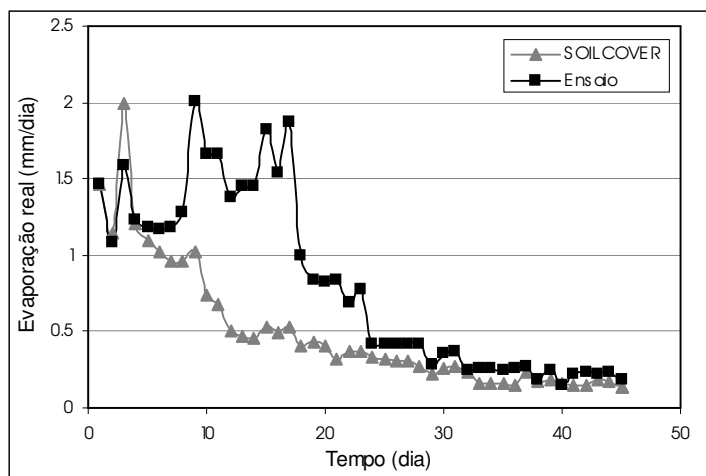


Figura 6-5 – Comparação entre os dados de evaporação real (mm/dia) *versus* tempo (dia).

De acordo com a figura 6.5, pode-se observar que os dados apresentam uma boa correlação no começo e no final do ensaio. Entretanto, entre os dias 4 e 23, os dados apresentam uma grande variação entre os resultados obtidos no ensaio e os resultados computados pelo programa SOILCOVER. Esta discrepância entre os resultados pode ser explicada pela própria diferença entre os resultados obtidos para a camada de argila (apresentada na figura 6.4).

6.4) Simulações de campo

As simulações de campo, como já mencionado anteriormente, foram realizadas com o objetivo de dimensionar uma cobertura, para pilhas de rejeitos de mineração geradores de acidez, que fosse eficiente no controle da drenagem acida de minas.

NEWMAN *et al.* (2001) realizaram um trabalho de dimensionamento de coberturas utilizando o programa SOILCOVER, onde foi sugerida a espessura de 10 metros para a camada de rejeito e a condição de nível d'água abaixo da camada de rejeito. Segundo os referidos autores, o uso de uma espessura inferior para a camada de rejeito, poderia influenciar na condição de contorno (ascensão de água do lençol freático) e alterar o desempenho da cobertura. Outra sugestão dos mesmos autores foi que eventos de chuva acima de 50 mm/dia fossem divididos em dois ou mais dias, para não ocorrer erro no cálculo do escoamento superficial (runoff), já que o mesmo ocorre quando uma chuva muito intensa excede a permeabilidade saturada da camada superior da cobertura.

Para avaliar a eficiência de vários tipos de coberturas para mitigação da drenagem ácida de minas, foram realizadas as seguintes simulações: (1) rejeito sem cobertura; (2) cobertura de 30 cm de argila; (3) cobertura de 60 cm de argila; (4) cobertura composta de barreira capilar dupla utilizando areia e (5) cobertura composta de barreira capilar dupla utilizando cinza de fundo. A figura 6.6 apresenta um desenho esquemático destas simulações, com as dimensões e os valores de teor de umidade gravimétrico inicial de cada camada.

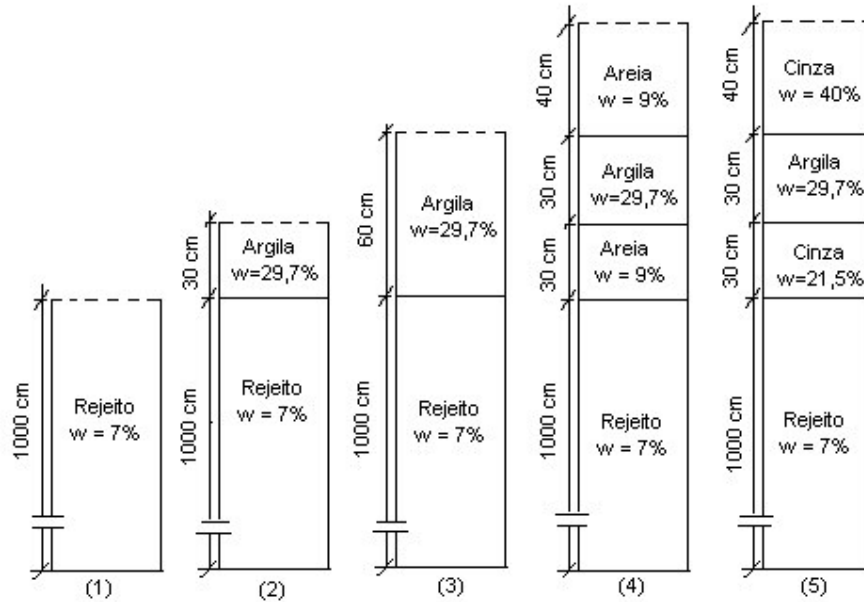


Figura 6-6 – Desenho esquemático das simulações de campo.

As propriedades dos materiais usados nas simulações de campo estão apresentadas na tabela 6.2. Como os valores de coeficiente de variação volumétrico (M_v) da areia e do rejeito não foram determinados a partir de ensaios, para estes foram adotados os valores sugeridos pelo programa. Na figura 6.7 apresentam-se os dados das curvas características da argila Picollo, da areia, da cinza de fundo e do rejeito. Onde os dados das curvas características foram obtidos pelos seguintes métodos: método do extrator de Richards para as amostras de argila Picollo e areia, método do papel-filtro para a mostra de cinza de fundo e método da placa de pressão para a amostra de rejeito. Os ajustes das curvas características foram obtidos pela equação de FREDLUND e XING (1994). Todos os valores referentes ao rejeito foram obtidos do trabalho de NEWMAN *et al.* (2001).

Tabela 6-2 – Propriedades dos materiais usados nas simulações de campo.

| Material | ζ | G_s | K_{sat} (cm/s) | M_v (1/KPa) | Q (%) | C_m (J/Kg.C) |
|----------------|---------|-------|-----------------------|-----------------------|-------|----------------|
| Argila Picollo | 0,464 | 2,581 | $1,12 \times 10^{-7}$ | $4,2 \times 10^{-4}$ | 70 | 750 |
| Cinza de fundo | 0,515 | 2,043 | $2,45 \times 10^{-4}$ | $6,44 \times 10^{-4}$ | 100 | 850 |
| Areia | 0,435 | 2,63 | $1,72 \times 10^{-2}$ | $9,1 \times 10^{-5}$ | 69 | 850 |
| Rejeito | 0,368 | 2,64 | $1,1 \times 10^{-3}$ | $9,0 \times 10^{-6}$ | 90 | 850 |

Obs. ζ é a porosidade; G_s é a densidade real dos grãos; K_{sat} é a permeabilidade saturada; M_v é o coeficiente de variação volumétrica; Q é a porcentagem de quartzo da amostra e C_m é o calor específico.

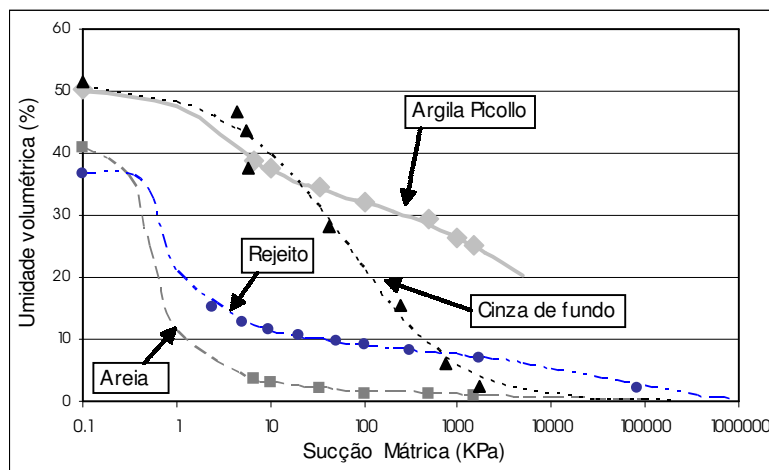
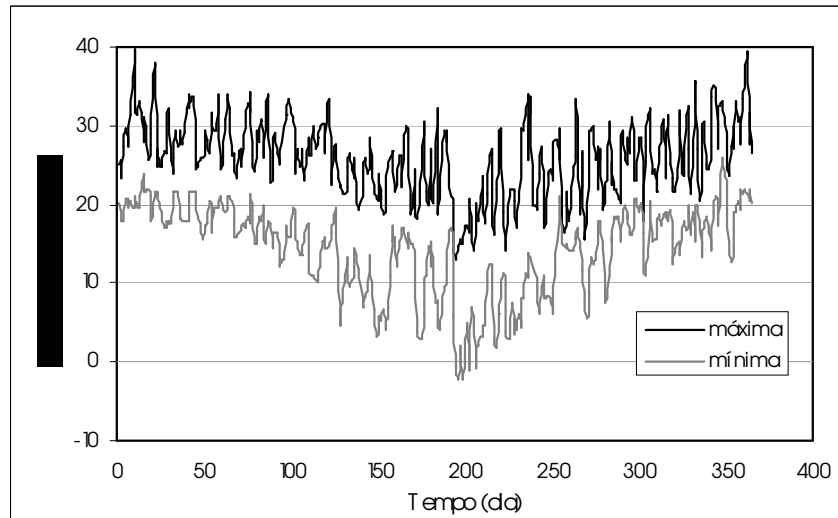
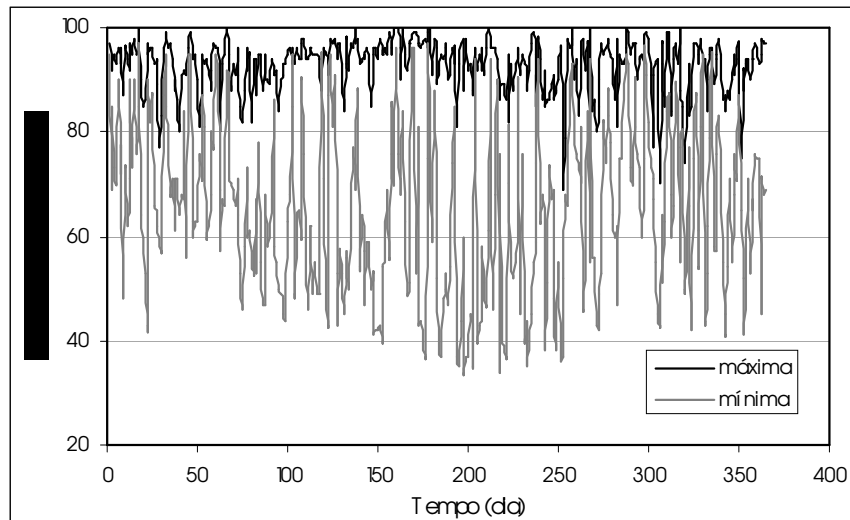


Figura 6-7 – Dados das curvas de retenção dos materiais usados nas simulações de campo.

Nas simulações de campo foram usados os dados climáticos da cidade de Criciúma – SC, apresentados na figura 6.8 e 6.9, referentes ao ano 2000. A figura 6.8(a) apresenta os dados diários de temperatura máxima e mínima e a figura 6.8(b) os dados diários de umidade relativa do ar máxima e mínima. A figura 6.9(a) apresenta os dados de precipitação e a figura 6.9(b) os dados de evaporação potencial. Vale ressaltar que para os gráficos das figuras 6.8 e 6.9, o dia 1 corresponde ao 1º dia de janeiro de 2000.

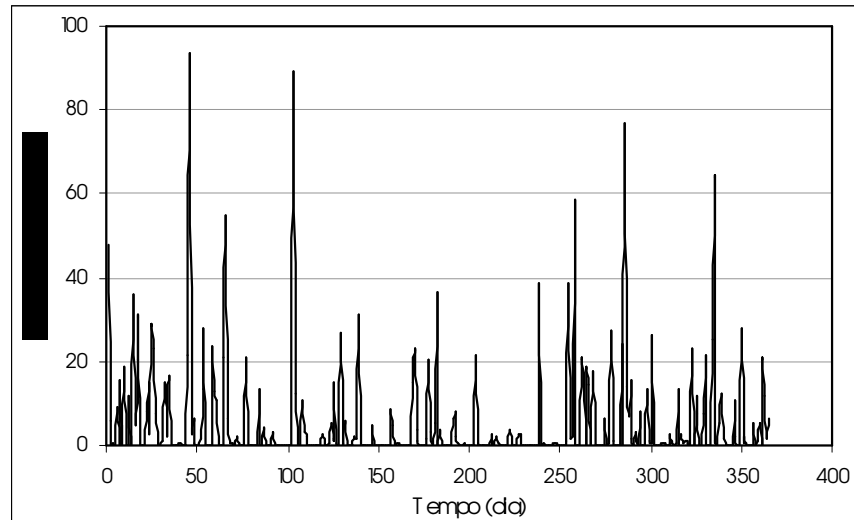


(a)

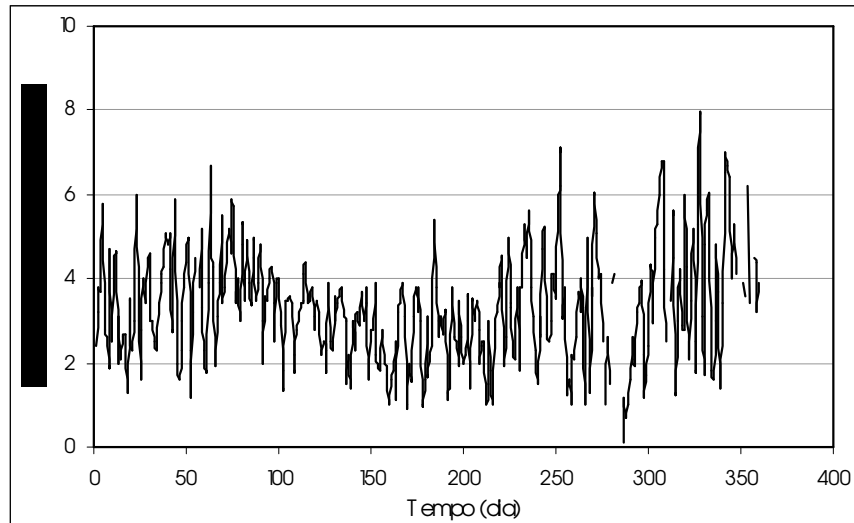


(b)

Figura 6-8 – Dados climáticos da cidade de Criciúma – SC, referentes ao ano 2000, (a) temperatura do ar máxima e mínima e (b) umidade relativa do ar máxima e mínima.



(a)

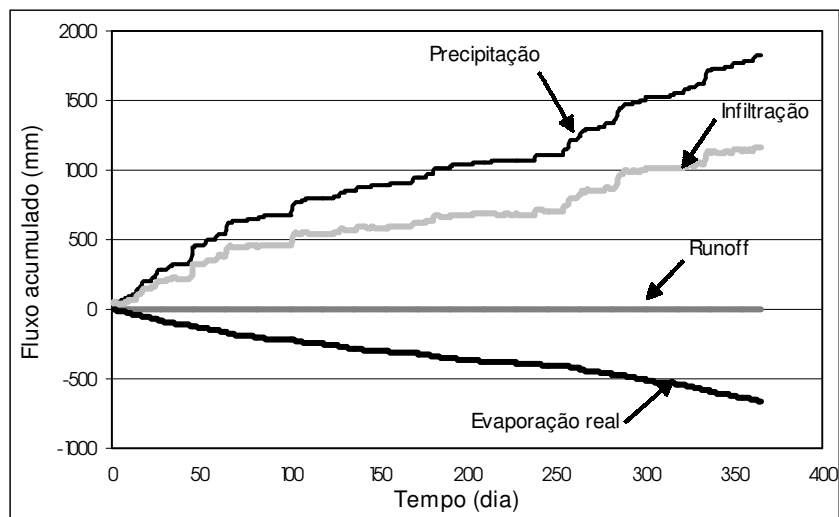


(b)

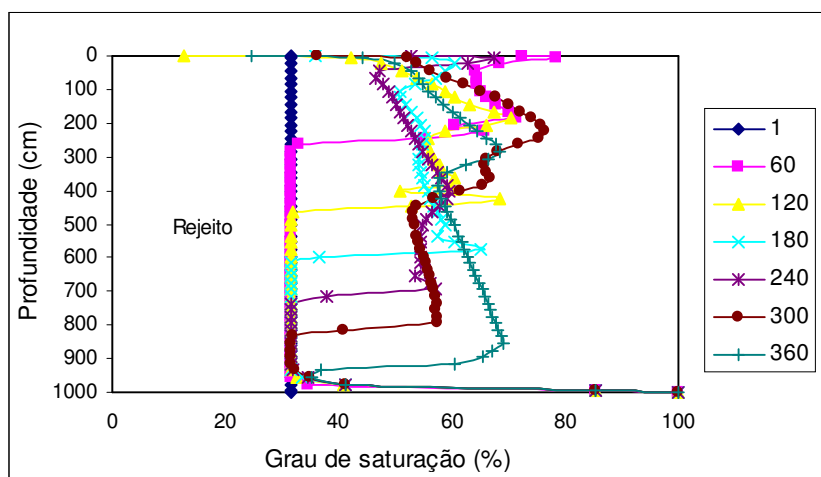
Figura 6-9 – Dados climáticos da cidade de Criciúma – SC, referentes ao ano 2000, (a) precipitação e (b) evaporação potencial.

(1) Rejeito sem cobertura

A figura 6.10 é referente à simulação de uma pilha de rejeito exposta ao tempo, com espessura de 10m e sem nenhum tipo de cobertura. Onde a figura 6.10(a) apresenta os resultados de fluxo de água acumulado *versus* tempo e a figura 6.10(b) apresenta o perfil do grau de saturação da camada de rejeito, a cada 60 dias.



(a)



(b)

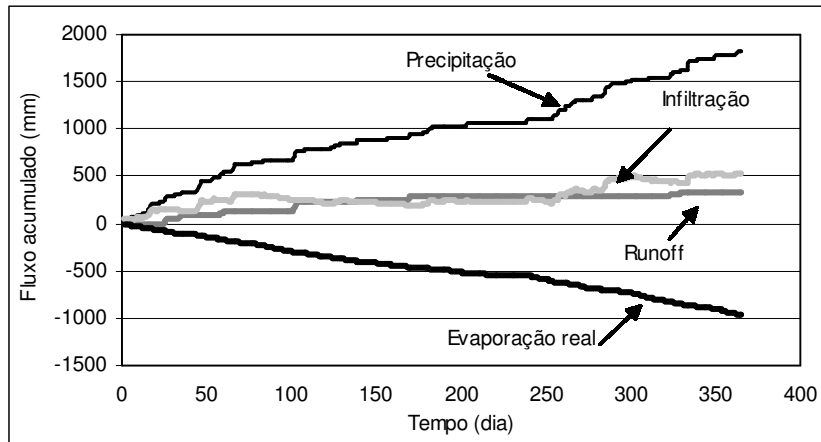
Figura 6-10 – Simulação de uma pilha de rejeito sem cobertura, (a) fluxo de água acumulado; (b) perfil do grau de saturação da camada de rejeito.

Segundo os resultados apresentados na figura 6.10(a), no final de um ano, 63,8% do valor da precipitação, que é de 1829,2mm, infiltrou na pilha de rejeito, ou seja, o rejeito recebeu uma infiltração anual de 1167,8mm de chuva. O escoamento superficial no rejeito foi nulo e a evaporação real anual foi de 661,4 mm. Na figura 6.10(b), pode ser observado que a camada de rejeito parte de uma condição inicial com baixo valor de grau de saturação e que este valor tende a aumentar ao longo do ano.

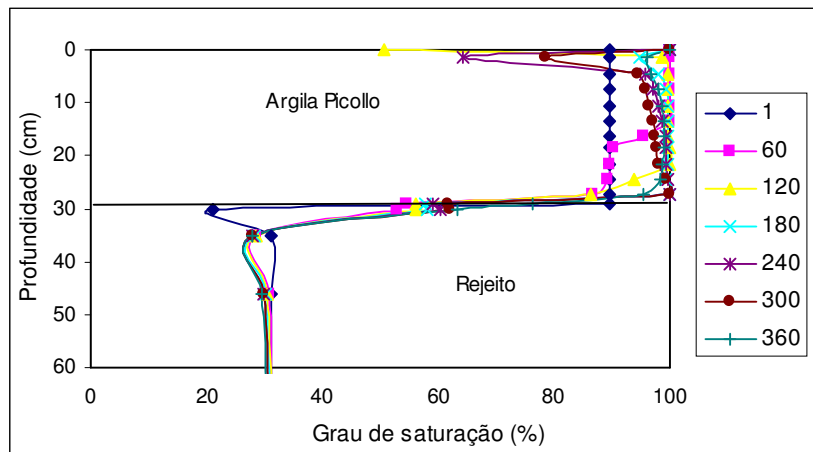
(2) Cobertura com 30 cm de argila

A figura 6.11 apresenta os resultados de uma simulação feita com uma cobertura de 30cm de argila compactada sobre uma camada de rejeito de 10 metros de altura. Onde a figura 6.11(a) apresenta os resultados de fluxo de água acumulado *versus* tempo, a figura 6.11(b) apresenta o perfil do grau de saturação da camada de cobertura e a figura 6.11(c) apresenta o perfil do grau de saturação da camada de rejeito. Sendo que nas figura 6.11(b) e 6.11(c) as simulações são apresentadas a cada 60 dias

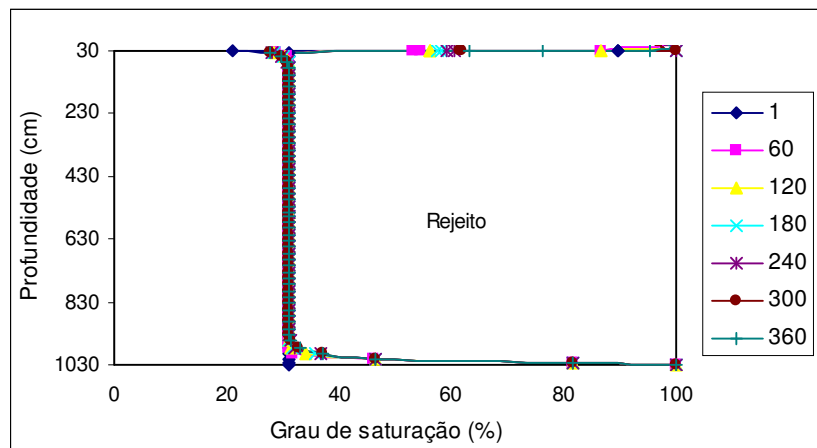
Segundo os resultados apresentados na figura 6.11(a), no final de um ano de simulação, 29% do valor da precipitação anual infiltrou no sistema cobertura/rejeito, o que corresponde a 531,27mm. O valor anual do escoamento superficial foi de 333,23mm e da evaporação real de 964,5mm. Na figura 6.11(b), observa-se que o grau de saturação da camada de cobertura permanece elevado, durante todas as épocas do ano e na figura 6.11(c) pode ser observado que a camada de rejeito permanece com o mesmo valor do grau de saturação durante toda a simulação.



(a)



(b)



(c)

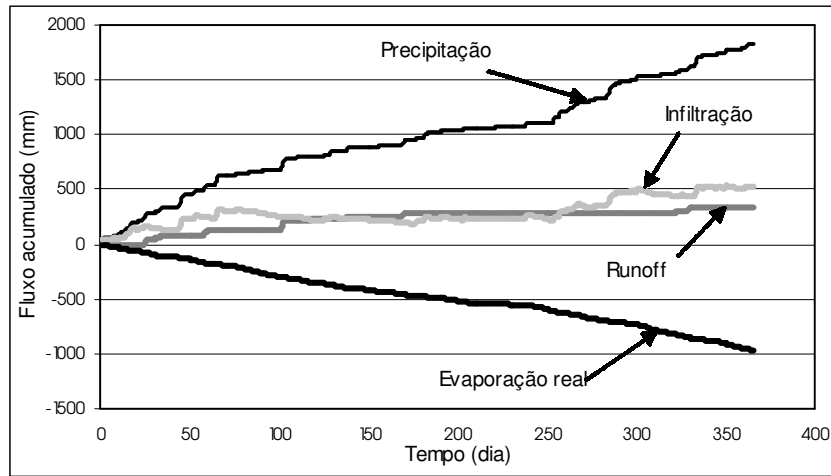
Figura 6-11 – Simulação de uma cobertura de 30 cm de argila, (a) fluxo de água acumulado; (b) perfil do grau de saturação da cobertura; (c) perfil do grau de saturação do rejeito.

(3) Cobertura com 60 cm de argila

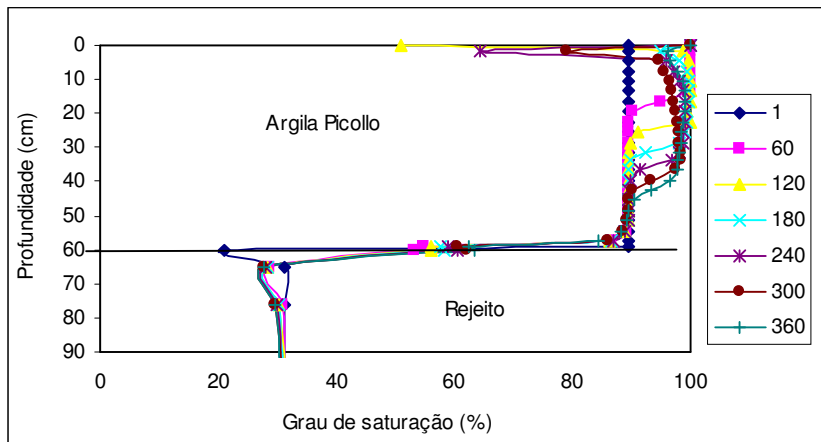
A figura 6.12 apresenta os resultados de uma simulação de uma cobertura de 60 cm de argila compactada sobre uma camada de rejeito de 10 metros de altura. Onde a figura 6.12(a) apresenta o fluxo de água acumulado durante o ano, a figura 6.12(b) apresenta o perfil do grau de saturação da camada de cobertura e a figura 6.12(c) apresenta o perfil do grau de saturação da camada de rejeito. Sendo que nas figura 6.12(b) e 6.12(c) as simulações são apresentadas a cada 60 dias

Com relação à figura 6.12(a), pode-se observar que a infiltração anual no sistema foi de 531,26 mm, ou seja, 29% da precipitação anual; o escoamento superficial anual foi de 333,45 mm e a evaporação real anual de 964,5 mm. Em relação aos demais gráficos da referida figura, observa-se novamente que a camada de cobertura se mantém com elevado grau de saturação durante todo o ano e que a camada de rejeito apresenta o mesmo valor de grau de saturação durante toda a simulação.

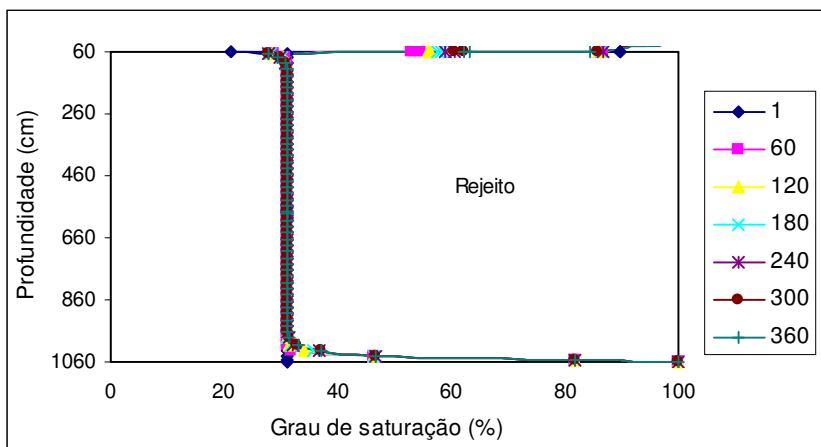
Fazendo uma comparação entre as simulações realizadas com coberturas de 30cm e 60cm de argila compactada, observa-se que ambas apresentaram o mesmo comportamento, com valores de grau de saturação na camada de argila superiores a 85%, o que indica, segundo YANFUL (1993), o bom desempenho deste tipo de cobertura para impedir a passagem de oxigênio para o interior do rejeito. No entanto, vale ressaltar, que em relação à infiltração as coberturas simples de argila apresentam valores elevados de infiltração anual.



(a)



(b)



(c)

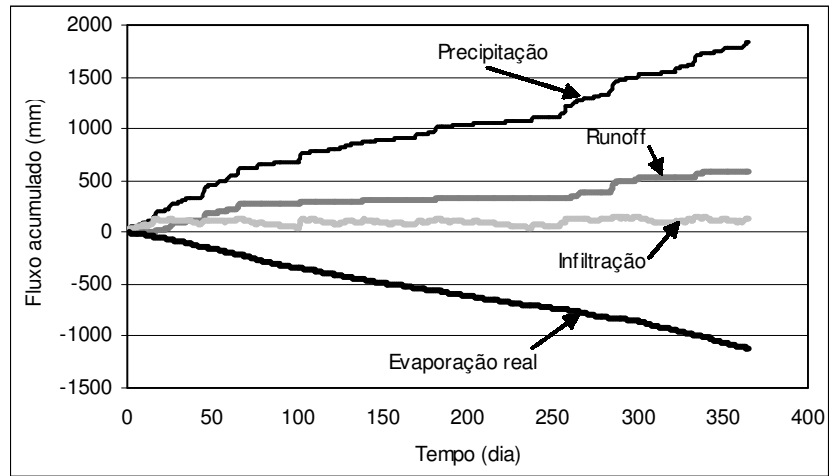
Figura 6-12 – Simulação de uma cobertura de 60 cm de argila, (a) fluxo de água acumulado; (b) perfil do grau de saturação da cobertura; (c) perfil do grau de saturação do rejeito.

(4) Cobertura de barreira capilar usando areia

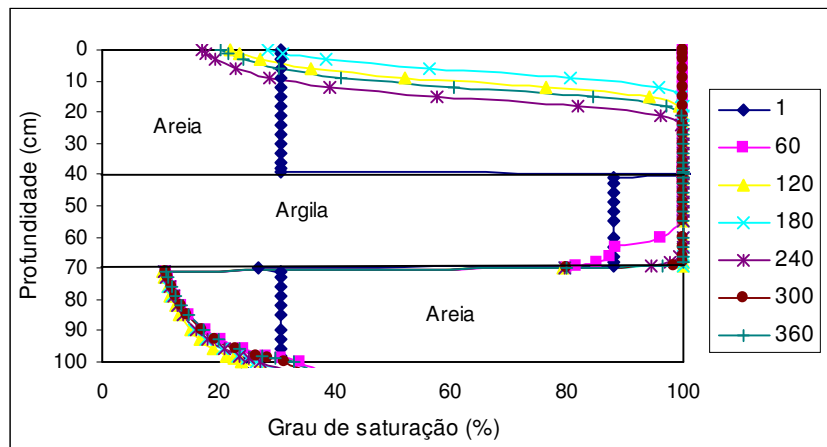
A figura 6.13 apresenta os resultados da simulação de uma barreira capilar composta por uma camada de argila colocada entre duas camadas de areia. Onde a figura 6.13(a) apresenta o fluxo de água acumulado durante o ano, a figura 6.13(b) apresenta o perfil do grau de saturação da camada de cobertura e a figura 6.13(c) apresenta o perfil do grau de saturação da camada de rejeito. Sendo que nas figura 6.13(b) e 6.13(c) as simulações são apresentadas a cada 60 dias

Com base nos resultados apresentados na figura 6.13(a), observa-se que a infiltração anual no sistema foi de 127,47mm, ou seja, 7% da precipitação anual. O escoamento superficial anual foi de 582,52mm e a evaporação real anual de 1119,22mm. Na figuras 6.13(b) e 6.13(c), observa-se novamente o mesmo comportamento, a camada de argila da cobertura ficou saturada praticamente toda a época do ano e a camada de rejeito manteve o mesmo valor de grau de saturação ao longo do ano.

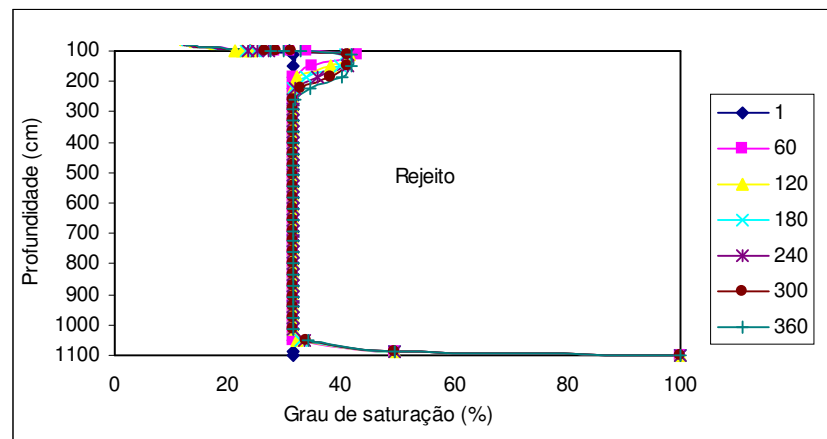
Fazendo uma comparação entre os resultados das simulações de campo utilizando uma cobertura simples de argila (de 30 ou 60cm de espessura) ou uma cobertura de barreira capilar utilizando areia, pode-se afirmar, que para as condições climáticas utilizadas, ambas funcionam como barreira ao transporte de oxigênio, entretanto, em relação à infiltração de água para o sistema cobertura/rejeito a cobertura de barreira capilar apresenta-se mais viável.



(a)



(b)



(c)

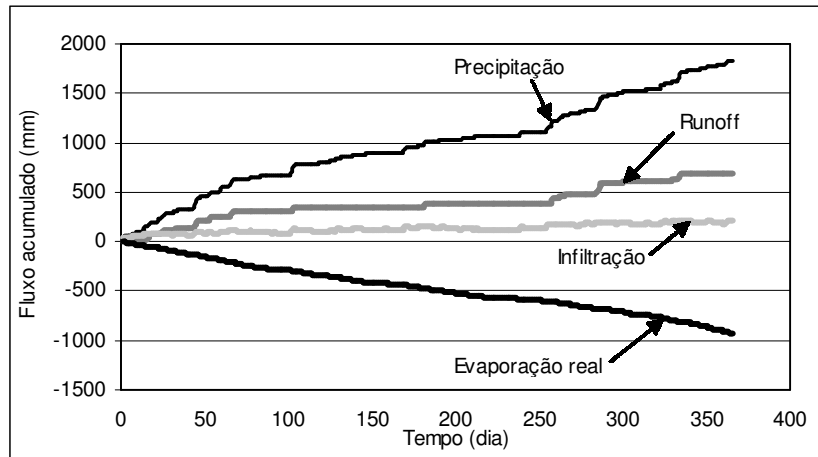
Figura 6-13 – Simulação de uma cobertura de barreira capilar usando areia (a) fluxo de água acumulado; (b) perfil do grau de saturação da cobertura; (c) perfil do grau de saturação do rejeito.

(5) Cobertura de barreira capilar usando cinza de fundo

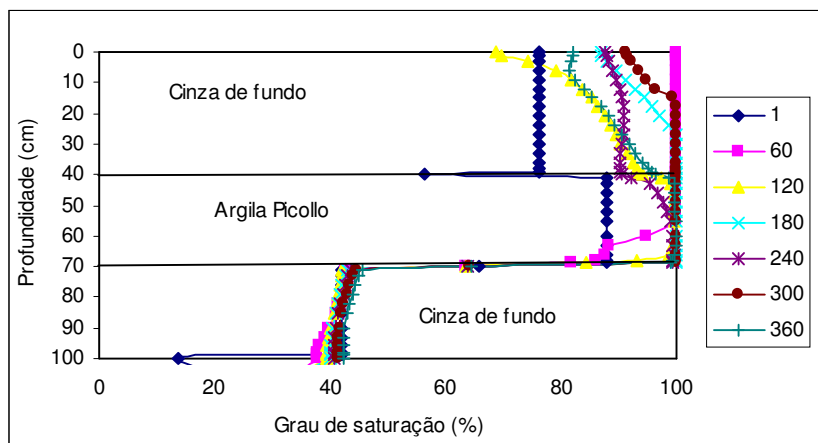
A figura 6.14 apresenta os resultados da simulação de uma barreira capilar composta por uma camada de argila colocada entre duas camadas de cinza de fundo. Onde a figura 6.14(a) apresenta o fluxo de água acumulado durante o ano, a figura 6.14(b) apresenta o perfil do grau de saturação da camada de cobertura e a figura 6.14(c) apresenta o perfil do grau de saturação da camada de rejeito. Sendo que nas figura 6.14(b) e 6.14(c) as simulações são apresentadas a cada 60 dias

Observa-se na figura 6.14 (a) que, o valor de infiltração anual foi de 209,4 mm, o que equivale a 11,4% da precipitação anual. O escoamento superficial anual foi de 694,95mm e evaporação real anual, de 924,86mm. No gráfico 6.14(b), observa-se que a camada de argila também é mantida com alto grau de saturação, e o gráfico 6.14(c) mostra que o grau de saturação da camada de rejeito não varia com o tempo.

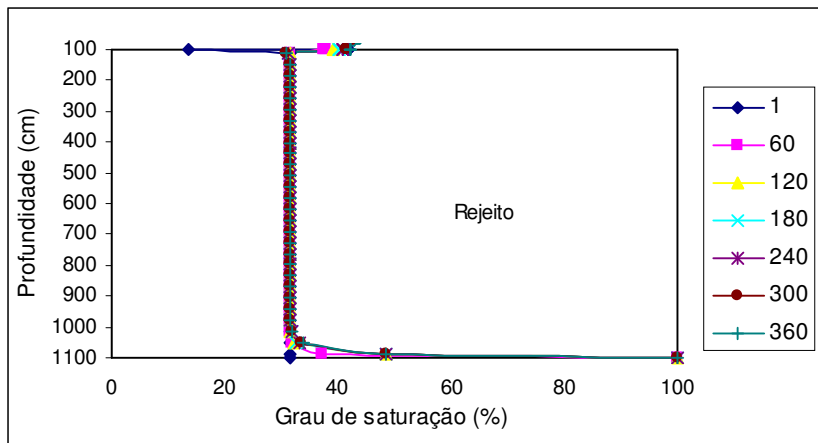
Fazendo uma comparação entre as simulações com coberturas de barreira capilar usando areia e cinza de fundo, observa-se que ambos os materiais apresentaram um bom desempenho como componente de uma barreira capilar, que tem como objetivo impedir a passagem de água e oxigênio para o interior do rejeito. Sendo que a areia apresentou um valor menor de infiltração de água no sistema cobertura/rejeito.



(a)



(b)



(c)

Figura 6-14 - Simulação de uma cobertura de barreira capilar usando cinza de fundo: (a) fluxo de água acumulado; (b) perfil do grau de saturação da cobertura; (c) perfil do grau de saturação da camada de rejeito.

6.5) Comentários Finais

Em relação à simulação do ensaio de evaporação, pode-se verificar que para as camadas de cinza o programa apresentou resultados satisfatórios comparados com os dados experimentais, entretanto, para a camada de argila, o mesmo não foi verificado. O que provavelmente ocasionou a diferença de resultados obtidos na camada de argila, foi utilizar dados de entrada do programa (dados de curva característica e permeabilidade saturada) que não representavam a condição inicial da camada de argila da coluna do ensaio de evaporação.

Em relação às simulações de campo realizadas pode-se concluir que:

- A simulação realizada para a camada de rejeito sem cobertura se mostrou bastante desfavorável em relação à passagem de água e oxigênio para o interior do rejeito. Obtendo um valor de infiltração anual referente a 63,8 % do valor da precipitação anual.
- Todas as simulações realizadas, para as condições climáticas da cidade de Criciúma no ano de 2000, usando algum tipo de cobertura, se mostraram eficientes como barreira de transporte de oxigênio, pois, todas conseguiram manter a camada de argila com grau de saturação acima de 85%, durante todo o período de simulação.
- Comparando as simulações entre uma cobertura simples de argila compactada e uma cobertura de barreira capilar dupla, pode-se observar a maior eficiência das barreiras capilares em relação à infiltração de água para o rejeito.
- Fazendo uma comparação entre as simulações de coberturas compostas por barreira capilar usando areia e usando cinza de fundo, observa-se que ambas apresentaram um bom funcionamento em relação a impedir a passagem de água e oxigênio para o interior do rejeito. O que comprova a viabilidade do uso da cinza de fundo como material constituinte de uma cobertura de barreira capilar.

Capítulo 7 – Conclusões e Sugestões para Pesquisas futuras

7.1) Conclusões

O problema da drenagem ácida de minas é considerado um dos maiores problemas ambientais a ser enfrentado pelas indústrias de mineração. A mineração de carvão, no sul do país, apresenta sérios problemas de geração de acidez, em especial na Região Carbonífera de Santa Catarina. Várias são as formas de controle da DAM. A de maior interesse para a Engenharia Civil e para a geotecnia é a utilização de coberturas secas sobre os aterros de resíduos geradores de acidez. Essas coberturas têm por objetivo minimizar a entrada de oxigênio e água para o resíduo, minimizando assim o processo de geração de acidez na sua origem. Por outro lado, as minerações de carvão, pela própria natureza do carvão brasileiro (baixo poder calorífico e elevado teor de cinza), geram grandes quantidades de cinza. Em função disso, o presente trabalho propõe a avaliação das cinzas (volante e de fundo) geradas no processo de combustão do carvão como material alternativo para as coberturas dos resíduos geradores de acidez. Os sistemas de coberturas analisados no presente trabalho são aqueles compostos por barreira capilar dupla.

Para verificar a viabilidade do uso das cinzas, para a finalidade proposta, realizaram-se ensaios de caracterização das amostras de cinzas, areia e argila, ensaios de evaporação em colunas compostas de três camadas e simulações usando o programa computacional SOILCOVER. Sendo que, estas simulações foram realizadas de duas formas: uma em condições de laboratório para comparação com os dados experimentais do ensaio de evaporação, e a outra extrapolando as condições de laboratório para as condições de campo. Com base nos resultados, foram apresentadas as seguintes conclusões:

a) quanto à caracterização das cinzas, da argila e da areia

- Pelo fato das cinzas de combustão do carvão (cinza de fundo e cinza volante) apresentarem características de material granular, as mesmas foram avaliadas quanto ao potencial uso em barreiras capilares, no lugar do material arenoso.
- Analisando o potencial de geração de acidez das amostras, os dois tipos de cinza podem ser classificados no campo das incertezas. O possível uso das cinzas como barreira de inibição da reação, foi descartado devido à baixa capacidade tampão das mesmas.
- De acordo com os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização e a definição de resíduo não inerte segundo a norma NBR 10004/2004, as duas cinzas estudadas foram classificadas como Resíduo Classe II A – Não Inerte. Destaca-se que, para a cinza de fundo, o único elemento que apresentou, na análise do extrato solubilizado, um valor acima do valor máximo permitido segundo a NBR 10004/2004 foi o alumínio. Considerando que, a finalidade proposta é usar a cinza de fundo como material de cobertura de aterro de resíduos de mineração, avalia-se, que o alumínio não influenciaria de forma significativa nas características do efluente gerado. De qualquer forma, vale ressaltar que, o fato de ser construída uma cobertura para minimizar a geração de drenagem ácida, não exclui a etapa de tratamento do efluente gerado.
- A análise feita em relação às curvas de permeabilidade não saturada demonstrou que, tanto a cinza de fundo como a areia não teriam um bom desempenho como barreira capilar quando sobrepostas por uma camada de argila Picollo. Entretanto, a análise feita com base no parâmetro AEV (valor de entrada de ar) da curva característica demonstrou o oposto.

b) quanto aos ensaios de evaporação

- No ensaio de evaporação, pôde-se verificar que a camada de argila apresenta um melhor desempenho, em relação à capacidade de retenção de água, quando

compõem o sistema de cobertura de barreira capilar do que em uma cobertura simples, levando-se em consideração apenas o efeito da evaporação.

- A coluna simples de areia perde água mais rapidamente que a coluna de simples de cinza de fundo, portanto, no caso de um período mais seco, a cinza de fundo seria mais indicada para a função de manter um elevado grau de saturação da camada de argila.
- Como o ensaio foi realizado para uma situação crítica, onde as colunas ficaram sujeitas somente ao processo de evaporação por 45 dias, a camada de argila da coluna composta não conseguiu manter-se com um teor de umidade suficiente para controlar o fluxo de oxigênio para dentro da camada de resíduos.

c) quanto às simulações do SOILCOVER

- A simulação do ensaio de evaporação realizada com o programa computacional SOILCOVER apresentou para as camadas de cinza, uma boa aproximação com os dados experimentais do ensaio. Entretanto, o mesmo não foi observado para a camada de argila.
- A análise de sensibilidade do programa SOILCOVER verificou que dos três parâmetros avaliados (curva característica, coeficiente de variação volumétrica e permeabilidade saturada), a permeabilidade saturada e a curva característica foram os parâmetros que apresentaram maior influência nos resultados das simulações do ensaio de evaporação.
- Ao contrário do que foi observado no ensaio de evaporação, todas as coberturas simuladas nas condições de campo (sujeitas ao processo de precipitação e evaporação) apresentaram um bom desempenho para minimizar o fluxo de oxigênio para o interior da pilha de resíduo.
- Nas simulações de campo, a cobertura com função de barreira capilar tem um desempenho muito melhor, em relação à infiltração de água no sistema

cobertura/rejeito, do que uma cobertura composta de apenas uma camada de argila compactada.

- As simulações de campo com coberturas de barreira capilar usando areia e cinza de fundo apresentaram um bom desempenho para impedir a passagem de água e oxigênio para o interior do rejeito. Embora, a simulação da barreira capilar usando areia tenha apresentado um valor menor de infiltração de água no sistema cobertura/rejeito, na ocorrência de um período mais seco, a cinza de fundo seria mais eficiente em manter o alto grau de saturação da camada de argila. O que comprova a viabilidade técnica da cinza de fundo para a finalidade proposta, que foi de utilizá-la como material alternativo em substituição do material arenoso, de uma barreira capilar, em uma cobertura de rejeito de mineração.

7.2) Sugestões para futuras pesquisas

São apresentadas as seguintes sugestões para continuidade dos estudos:

- Novos ensaios de evaporação em colunas compostas por mais de um material, utilizando colunas de dimensões maiores e instrumentadas com aparelhos para medir ao longo do perfil das colunas teor de umidade, temperatura e sucção.
- Estudo de campo, com monitoramento para diferentes tipos de coberturas.
- Um estudo mais aprofundado do funcionamento do programa computacional SOILCOVER, fazendo uma análise de sensibilidades do programa em relação a outros parâmetros.
- Mais estudos a respeito dos diferentes métodos de obtenção da curva característica. Devido à variação dos resultados obtidos neste estudo.

Capítulo 8 – Bibliografia

Referências Citadas e Consultadas

- ABNT / NBR 6457:1986, “Amostras de solo – Preparação para ensaio de compactação e ensaios de caracterização”, 7p.

- ABNT / NBR 10005:1987, “Lixiviação de Resíduos”, 7p.

- ABNT / NBR 10005:2004, “Procedimento para obtenção de extrato de lixiviado de resíduos sólidos”, 16p.

- ABNT / NBR 10006:2004, “Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos”, 3p.

- ABNT / NBR 10004:2004, “Resíduos sólidos – Classificação”, 71p.

- ABNT / NBR 7181:1984, “Solo – Análise granulométrica”, 13p.

- ABNT / MB-3324:1990, “Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos”, 6p.

- ABNT / MB-3388:1991, “Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos”, 14p.

- ABNT / NBR 6459:1984, “Solo - Determinação do limite de liquidez”, 6p.

- ABNT / NBR 7180:1984, “Solo – Determinação do limite de plasticidade”, 3p.

- ABNT / NBR 7182:1986, “Solo – Ensaio de compactação”, 10p.

- ABNT / NBR 12007:1990, ‘Solo - Ensaio de adensamento unidimensional’, 13p.
- ASTM D 5298- 03, ‘Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper’, 6p.
- 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. (1998) ‘Acidificação e liberação de metais pesados em sedimentos de dragagem ricos em sulfetos de Ferro’ Tese de doutorado apresentada ao departamento de engenharia civil da COPPE/UFRJ.
- 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. (2003), ‘Ensaio para determinação da velocidade intrínseca de oxidação em resíduos geradores de acidez’. V REGEO – Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Porto Alegre, RS.
- BORMA, L.S., MENDONÇA, R. M. G., SOUZA, V. P., *et al.* (2003), ‘Utilização de cinza no contexto da reabilitação de áreas mineração de carvão’. V REGEO – Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Porto Alegre, RS.
- 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.
- CALLE, J. A. C. (2000), ‘Análise de ruptura de talude em solo não saturado’ - Tese de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- 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.

- CHIES, F., SILVA, N. I. W., ZWONOK, O. (2003) "Desenvolvimento de blocos e tijolos a partir de cinzas de fundo de carvão - CIPECAL". In: Utilização de Resíduos na construção Habitacional – Coletânea Habitare – Volume 4 – Cap. 7 – Porto Alegre-RGS, Editora ANTC.

- DNER – ME 093 (1994) "Solos – Determinação da densidade real dos grãos" 4 p.

- EPA (1994), "Acid mine drainage prediction". December

- EMBRAPA (1997), "Manual de métodos de análise de solos". Centro Nacional de Pesquisa de Solos Rio de Janeiro - 2ª edição, 212p.

- 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.; MORGENSTERN, N. R. (1976), "Constitutive relations for volume change in unsaturated soils". Can. Geot. J., 13: 261-276.

- 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., XING, A., HUANG, S. (1994), "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve". Can. Geotech. J. 31 pp 533-546.

- 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., SAYÃO, A. S. F. J. (2002), "Evaluation of the soil -water characteristic curve equations for soil from Brazil". Unsaturated Soils - Recife – Brasil, Vol 1, 295-300.

- 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.

- HARTLÉN, J., CARLING, M., NAGASAKA, Y. (1997), "Recycling or reuse of waste materials in geotechnical applications". Environmental Geotechnics. Balkema, Rotterdam, 1493- 1513.

- HEINECK, K. S (2000), "Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis". Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RGS.

- HEINECK, K. S., CONSOLI, N.C., BICA, A.V. D., *et al.* (2003), "Utilização de cinzas de carvão visando sua aplicação como material geotécnico". V REGEO – Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Porto Alegre, RGS.

- 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.

- LOUNGON-DUARTE, A.P., DE CAMPOS, T.M.P., ARARUNA, J. T. (2004), ‘Efeitos da Temperatura na relação umidade-sucção de dois solos’. 5º Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados – São Carlos – Brasil, 235-242.

- MARINHO, F. A. M. (1994-a), ‘Medição de sucção com o método do papel filtro’.X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Soos 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.

- MEND 2.20.1 (1994), ‘Evaluation of alternative dry covers for the inhibition of acid mine drainage from tailings’. March.

- MENDONÇA, R. M. G., (2004) Comunicação pessoal, tese de doutorado em andamento.

- 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.

- 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.

- NISHIKAWA, J., SATO, A., AMANO, K. (2002), "Utilization of coal ash as filling materials". 4° ICEG- International Congress Environmental Geotechnis, Rio de Janeiro – Brasil, 615- 618.

- O'KANE, M., AYRES, B., CHRISTENSEN, D. *et al.* (2002), "Manual on cover system design for reactive mine waste" CANMET-CETEM OKC Report no 689-01, june.

- OLIVEIRA, D. R., GITIRANA Jr, G. F. N., PEREIRA, J. H. F. (2004), "Influência das propriedades hidráulicas na evaporação de solos colapsíveis não saturados". 5° Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados – São Carlos – Brasil, 161-167.

- OLIVEIRA FILHO, W. L. (1987), "Considerações sobre ensaios triaxiais em areias". Tese de mestrado apresentada ao departamento de engenharia civil da COPPE/UFRJ. 226p.

- PINTO, C. S., (2002), "Curso básico de mecânica dos solos". 2ª edição, Oficina de Textos, 355 p.

- PINTO, N. L. S., HOLTZ, A. C. T., MARTINS, J.A. *et al.* (1976) "Hidrologia Básica". Editora Edgard Blucher Ltda. - 278 p.

- REICHARDT, K. (1987), "A água em sistemas agrícolas" – Editora Manole

- 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.

- SCOTT, R. F., WESLEY, A. (1965) "Principles of soil mechanics" Publishing Company.

- SHACKELFORD, C. D. (1997), "Modeling and Analysis in environmental geotechnics: An overview of practical applications". Second International Congress on Environmental 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.

- SOBECK, A.A., SCHULLER, W. A., FREEMAN, J.R., *et al.* (1978) "Field and laboratory methods applicable to overburden and minesoils" Us Environmental Protection Agency – EPA 600/Z-78-054.

- SOUZA, V. P. (2001) "Formação de barreira geoquímica para abatimento de drenagens ácidas de pilhas de estéril piritoso". Tese de Doutorado apresentado a Universidade de São Paulo – SP. Março -142 p.

- 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.

- 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.
- WILSON, G. W.; FREDLUND, D.G.; BARBOUR, S.L. (1994) 'Coupled soil-atmosphere modeling for soil evaporation'. *Can. Geotech. J.* 31 pp 151 - 161.
- 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.
- 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, N° 8, August.
- YONG, R. N., WARKENTIN, B. P., PADHUNGCHWIT, Y., *et al.* (1990) 'Buffer capacity and lead retention in some clays materials water'. *Air and Soil Pollution*, 53, p. 53-67. ". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42, 392-395

Referências Citadas

- ARBHABHIRAMA, A.; KRIDAKOM (1968), 'Steady Downward flow to a water". *Water Resources Res.*, Vol 4.
- AUBERTIN, M.; RICARD, J. F.; CHAPUIS, R. P. (1998), "A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines". *Can. Geot. J.* 35: 55-69.

- BRIGGS, L. J.; SHANTZ, H. L. (1912), "The wilting coefficient for different plants and its indirect determination". 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.

- CAMPBELL, G. S. (1974), "A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data". Soil Science 117, 311-314.

- DAVIDSON, J. M.; STONE, L. R.; NIELSEN, D.R. *et al.* (1969), "Field measurement and use of soil water properties". 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.

- 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.
- 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.

- 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.

- LEONG,E. C.; RAHARDJO, H. (1998), 'Review of soil -water charact. curve Eq.". J. Geot. and Geoenv. Eng., dez., pp1106-1117.

- 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.

- MUALEN, Y.; DAGAN, G. (1978), 'Hydraulic conductivityof soils: unified approach to the statistical models". Soil Sci. Soc. Am. J., 42, 392-395.

- PENMAN, H. L. (1948), 'Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass". Proccedings of the Royal Society of London, Series A, 1993: 120-145.

- 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.

- ROGER, B. C., HERNBERGER, G. M. (1978) – 'Empirical equations for some soil hydraulic properties". Water Res. Res., 14, pp.601-604.

- SAXTON, K. E.; RAWLS, J. S.,; HOMBERGER; PAPENDICK, (1986), 'Estimating generalizec soil-water characteristics from texture". Soil Sci. Soc. Am. J., 50, 1031-1036.

- 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 moisture content on plant production". *Inst. Land Water Management, Tech. Bull.*

- VRIES, D. A. (1963), "Thermal properties of soils". *Physics of Plant Environment*, W. R. Van Wijk (ed.). North Holland Pub. Co. pp. 382.

- 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 evaluation of evaporative fluxes from unsaturated soil surfaces". Ph.D. thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon.

- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (1947), *International glossary of hydrology*. WMO Report No. 385.

Anexo

Este anexo apresenta um estudo paramétrico do programa SOILCOVER, com a finalidade de avaliar quais os parâmetros de entrada do modelo, referentes à caracterização dos materiais, apresentam maior influência nos resultados das simulações. Os parâmetros analisados foram: curva de retenção solo-água, coeficiente de variação volumétrica e condutividade hidráulica saturada. Este estudo foi realizado com os dados experimentais da segunda série dos ensaios de evaporação, sendo dividido em duas etapas: i) alterações nos parâmetros da cinza de fundo, ii) alterações nos parâmetros da argila Picollo.

Vale ressaltar que todas as simulações apresentadas neste anexo foram realizadas com os dados climáticos de laboratório, referentes aos dias em que ocorreram a segunda série dos ensaios de evaporação, assim como a malha de elementos finitos foi configurada com base no mesmo ensaio. Estes dados estão apresentados no item 6.3 desta dissertação.

(1) Cinza de fundo

As alterações realizadas nos parâmetros de caracterização da cinza de fundo foram realizadas com base nas características apresentadas na tabela A.1 e na figura A.1. A referida tabela apresenta todos os valores de entrada do modelo referentes à caracterização da cinza de fundo e da argila Picollo. Onde ϕ é a porosidade, G_s a densidade real dos grãos, K_{sat} a permeabilidade saturada, M_v o coeficiente de variação volumétrico, $\theta_m \times \epsilon$ é o ensaio que foi obtido os dados da curva de retenção (PF representa o ensaio do papel-filtro e ER o extrator de Richards), Q a percentagem de quartzo e C_m o calor específico do solo. A figura A.1 apresenta os dados experimentais da curva de retenção da cinza de fundo e da argila Picollo, obtidos dos ensaios do papel-filtro e do extrator de Richards, respectivamente.

Tabela A.1 – Propriedades dos materiais.

| Material | ζ | G_s | K_{sat} (cm/s) | M_v (1/KPa) | $\phi_m \times e$ | Q (%) | C_m (J/Kg.C) |
|----------------|---------|-------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-------|----------------|
| Argila Picollo | 0,464 | 2,581 | $1,12 \times 10^{-7}$ | $4,2 \times 10^{-4}$ | ER | 70 | 750 |
| Cinza de fundo | 0,515 | 2,043 | $2,45 \times 10^{-4}$ | $6,44 \times 10^{-4}$ | PF | 100 | 850 |

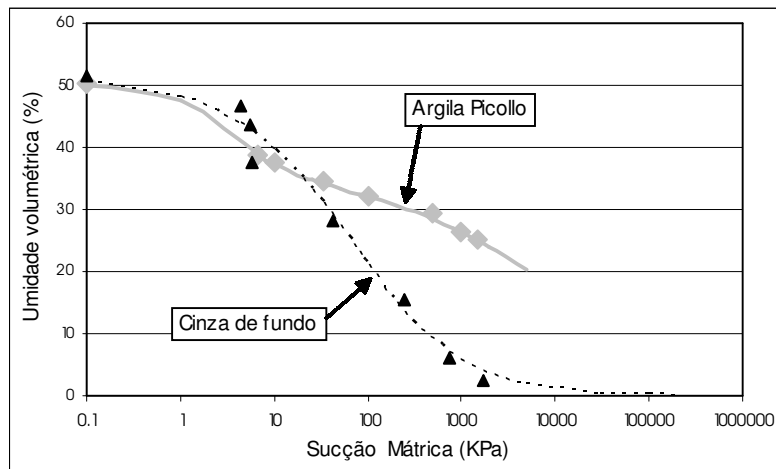
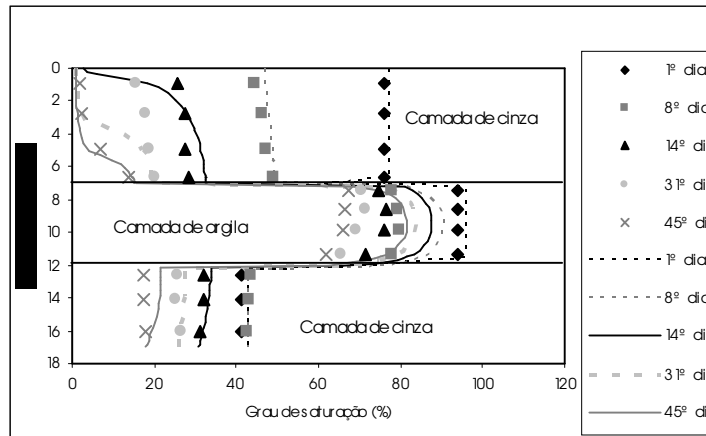


Figura A.1 – Curvas de retenção solo-água da cinza de fundo e da argila Picollo.

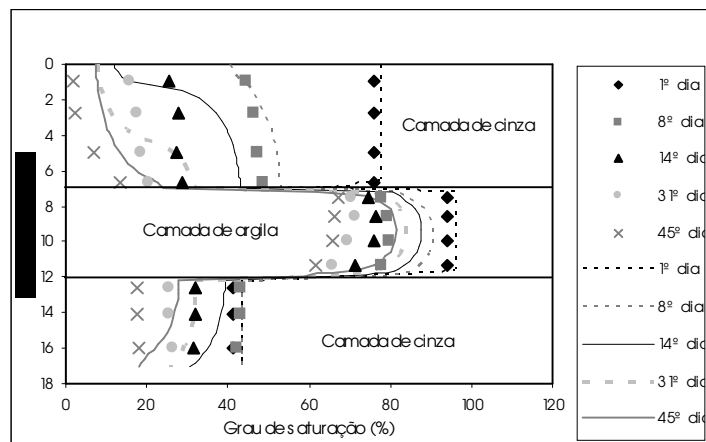
- Variação da curva de retenção

A figura A.2 apresenta a comparação entre duas simulações onde foram mudados apenas os dados da curva de retenção da camada de cinza de fundo. Onde o gráfico (a) representa os dados da curva de retenção obtidos pelo ensaio do papel-filtro (PF) e o gráfico (b) os dados obtidos pelo extrator de Richards (ER).

A figura A.3 apresenta a diferença entre as curvas de retenção da cinza de fundo obtidos pelo dois métodos.



(a)



(b)

Figura A.2 – Simulações realizadas alterando apenas os dados da curva de retenção da cinza, (a) dados obtidos pelo papel-filtro e (b) pelo extrator de Richards.

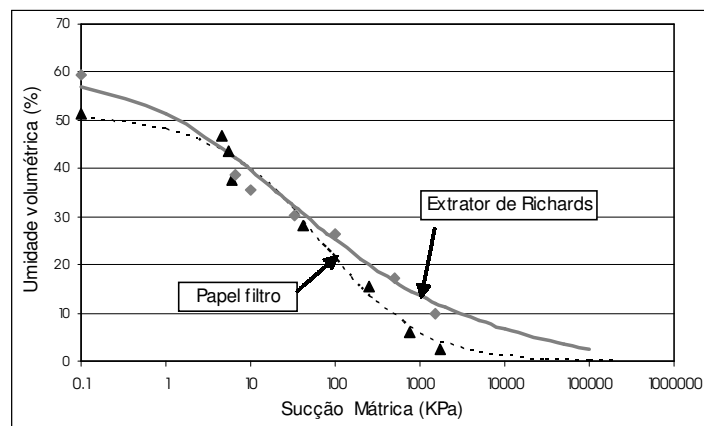


Figura A.3 – Curvas de retenção da cinza de fundo obtidas pelo método do papel-filtro (PF) e pelo extrator de Richards (ER).

Como pode ser observada na figura A.2, houve uma grande diferença entre as simulações apresentadas nos dois gráficos. Analisando somente as camadas de cinza, observa-se que a figura A.2(a) apresentou uma melhor aproximação entre os dados obtidos do ensaio com os computados pelo modelo, e em relação à figura A.2(b) pode-se perceber que na simulação a coluna de cobertura reteve mais água do que no ensaio. Esta diferença pode ser explicada pela possível variação do índice de vazios inicial do corpo de prova utilizado no ensaio do extrator de Richards (conforme descrito no item 4.2.7). As diferenças entre as simulações apresentadas nesta figura indicam que os pontos da curva característica são de extrema relevância nas simulações.

- Variação do coeficiente de variação volumétrica (M_v)

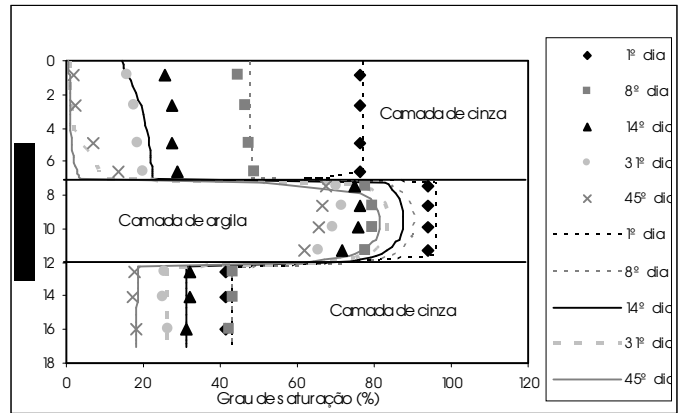
Foram realizadas quatro simulações usando diferentes valores do coeficiente de variação volumétrica (M_v) da cinza de fundo. Os valores de M_v utilizados foram: $6,4 \times 10^{-5}$ (1/KPa), $6,4 \times 10^{-4}$ (1/KPa), $6,4 \times 10^{-3}$ (1/KPa) e $6,4 \times 10^{-2}$ (1/KPa). Para estes valores não foi observado nenhum tipo de modificação nas simulações. Entretanto, vale ressaltar que as simulações foram realizadas com a espessura de 17cm, onde a variação da tensão vertical é mínima. Portanto, para as simulações do ensaio de evaporação o valor de M_v não foi um fator de grande relevância, porém, este parâmetro deve ser avaliado para uma condição real de campo.

- Variação da condutividade hidráulica saturada

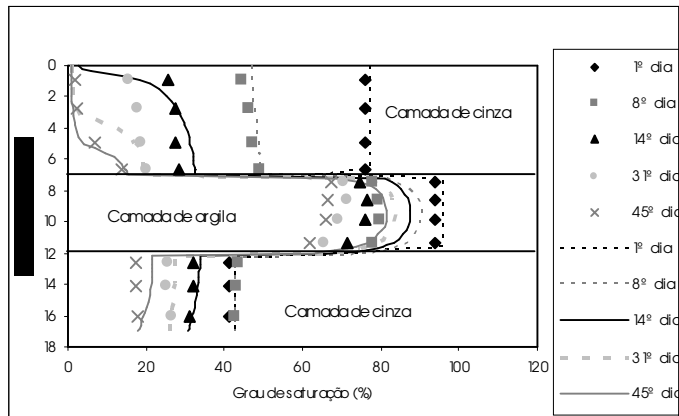
Foram realizadas três simulações alterando os valores da condutividade hidráulica saturada da cinza. A figura A.4 apresenta uma comparação entre estas simulações, sendo que no gráfico (a) utiliza-se uma permeabilidade de $2,45 \times 10^{-3}$ (cm/s); (b) uma permeabilidade de $2,45 \times 10^{-4}$ (cm/s) e (c) uma permeabilidade de $2,45 \times 10^{-5}$ (cm/s).

De acordo com a referida figura, pode-se observar a grande influência do valor de permeabilidade saturada nas simulações. O gráfico A.4(b) apresenta a simulação realizada com o valor de permeabilidade saturada obtido de ensaio de laboratório, o qual apresentou a melhor aproximação com os dados do ensaio. O gráfico A.4(a) foi simulado aumentando valor da permeabilidade saturada da camada de cinza de uma ordem de grandeza, o que fez com que a cobertura apresentasse uma maior perda de

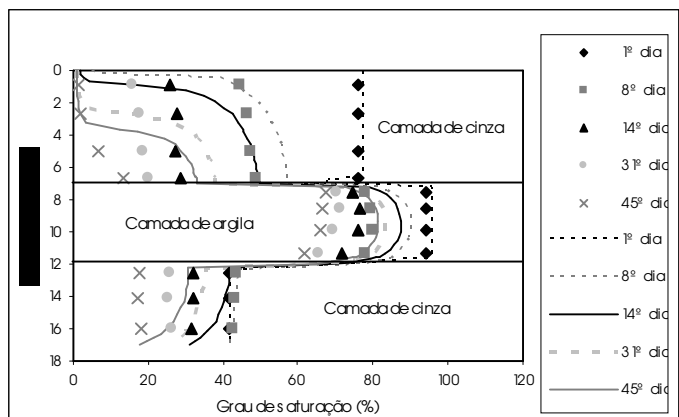
água para a atmosfera e o gráfico A.4(c) apresenta a simulação usando um valor da permeabilidade saturada reduzido de uma ordem de grandeza, e como esperado a cobertura reteve mais água.



(a)



(b)



(c)

Figura A.4 - Simulações realizadas variando os valores de permeabilidade saturada da cinza, (a) $2,45 \times 10^{-3}$ (cm/s); (b) $2,45 \times 10^{-4}$ (cm/s) e (c) $2,45 \times 10^{-5}$ (cm/s).

(2) Argila Picollo

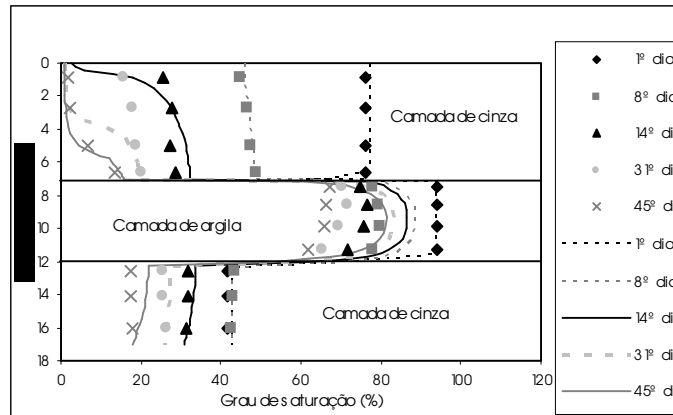
Nas simulações apresentadas a seguir foram feitas alterações somente no valor da permeabilidade saturada da argila Picollo. As demais propriedades da argila Picollo e todas as propriedades da cinza de fundo permanecem as mesmas que foram apresentadas na tabela A.1 e na figura A.1.

- Variação da permeabilidade saturada

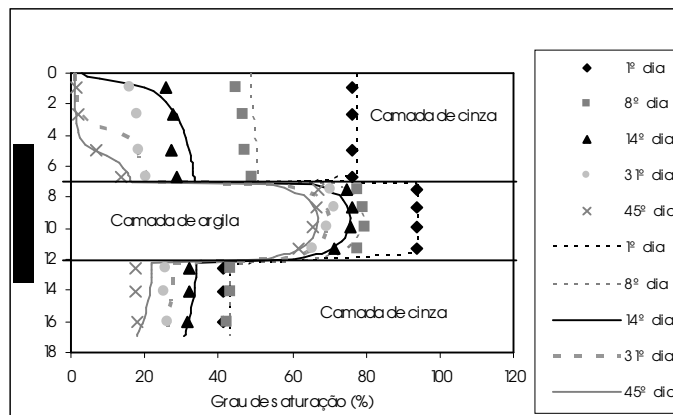
As simulações apresentadas na figura A.5 foram realizadas para os seguintes valores de permeabilidade saturada da argila Picollo: no gráfico (a) utiliza-se $1,1 \times 10^{-7}$ (cm/s); (b) $1,1 \times 10^{-6}$ (cm/s) e (c) $1,1 \times 10^{-5}$ (cm/s).

Em relação à figura A.5, pode-se observar mais uma vez, a grande influência do valor da permeabilidade saturada em relação às simulações. No gráfico A.5(a) foi utilizado o valor de permeabilidade saturada obtido em ensaio, no gráfico A.5(b) este valor foi reduzido de uma ordem de grandeza e no gráfico A.5(c) de duas ordens de grandeza. Apesar do gráfico (a) representar o valor de permeabilidade saturada obtida em ensaio, foi o gráfico (b), que apresentou uma melhor aproximação entre os dados de ensaio com os dados computados pelo programa SOILCOVER.

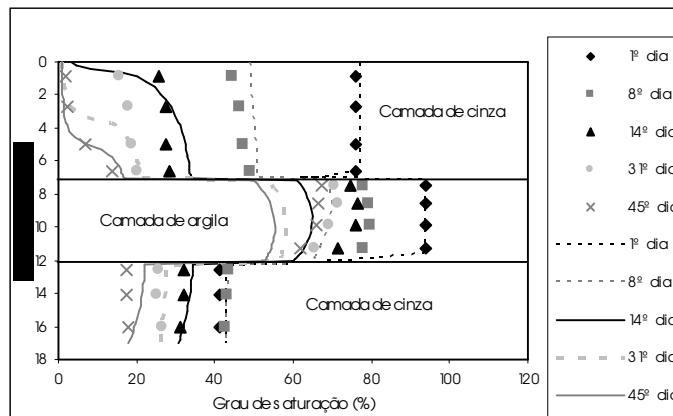
Pode-se afirmar em relação à camada de argila, que o programa não apresentou uma boa correlação com os dados do ensaio de evaporação, quando foram utilizados os valores obtidos dos ensaios de permeabilidade saturada e curva característica da argila como dados de entrada do programa. Este fato pode ser explicado pela diferença entre a forma de compactação e teor de umidade inicial dos corpos de prova utilizados para os referidos ensaios e a condição inicial da camada de argila da coluna de evaporação. Os corpos de prova usados nos ensaios de permeabilidade saturada e curva característica do solo foram compactados na umidade inicial de 29,74% com energia de Proctor Normal e as camadas de argila das colunas de evaporação foram todas compactadas estaticamente na umidade inicial de 31,5%, ou seja, os valores dos referidos ensaios não estão representando a condição inicial do ensaio de evaporação das colunas.



(a)



(b)



(c)

Figura A.5 - Simulações realizadas variando os valores de condutividade hidráulica saturada da argila, (a) $1,1 \times 10^{-7}$ (cm/s); (b) $1,1 \times 10^{-6}$ (cm/s) e (c) $1,1 \times 10^{-5}$ (cm/s).