



**COPPE/UFRJ**

**AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DO DESEMPENHO DE COBERTURA SECA EM  
BARREIRA CAPILAR DUPLA EM REJEITO DE MINERAÇÃO**

Beatriz Pereira Triane

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Maria Claudia Barbosa

Anderson Borghetti Soares

Rio de Janeiro

Julho de 2010

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

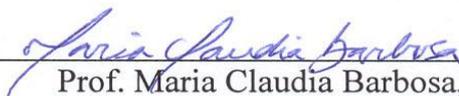
Milhares de livros grátis para download.

AValiação GEOTÉCNICA DO DESEMPENHO DE COBERTURA SECA EM  
BARREIRA CAPILAR DUPLA EM REJEITO DE MINERAÇÃO

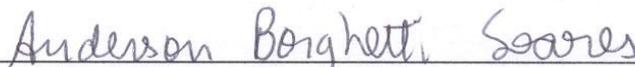
Beatriz Pereira Triane

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:



Prof. Maria Claudia Barbosa, D.Sc



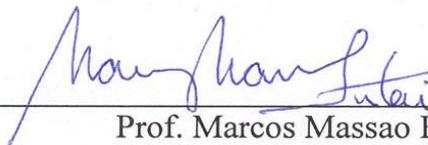
Dr. Anderson Borghetti Soares, D. Sc.



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



Prof. Nelson Ferreira Fernandes, D.Sc.



Prof. Marcos Massao Futai, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2010

Triane, Beatriz Pereira

Avaliação geotécnica do desempenho de cobertura seca em  
barreira capilar dupla em rejeito de mineração / Beatriz Pereira

Triane – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XVI, 117 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Maria Cláudia Barbosa

Anderson Borghetti Soares

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de  
Engenharia Civil, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 102-110.

1. Drenagem ácida. 2. Rejeito 3. Barreira capilar dupla.  
I. Barbosa, Maria Cláudia *et al.* II. Universidade Federal do  
Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III.  
Título.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta conquista aos  
meus pais, Ailton e Katia, e à  
minha irmã Alice.

## AGRADECIMENTOS

“Deus não escolhe os capacitados, mas capacita os escolhidos”. É com esta frase que gostaria de começar os meus agradecimentos, porque sem Deus eu não seria nada. Senhor muito obrigada por tudo que tenho e sou.

Agradeço minha família que me sustentou e apoiou em todos os momentos da minha vida, desde os primeiros passos até aqui. Aos meus pais, Ailton e Katia, gostaria de agradecer os esforços e sacrifícios feitos para a minha educação. Alice, minha irmã querida, obrigada por fazer parte da minha vida. Quero dizer que amo vocês e que sou grata pelo verdadeiro significado de amor, amizade e companheirismo.

Meus agradecimentos aos professores da área de Geotecnia que tanto contribuíram para o meu desenvolvimento profissional. Em especial à professora Maria Claudia que sempre esteve presente durante a pesquisa sanando dúvidas e contribuindo intensamente para o desenvolvimento da pesquisa.

A todos os professores que aceitaram o convite para a banca e que com certeza contribuíram muito para o trabalho. Em especial ao Dr. Anderson Borghetti que além de orientador foi uma pessoa que contribuiu muito para a realização do trabalho se tornando um amigo.

Ao CETEM pelo apoio durante a pesquisa e a Carbonífera Criciúma-SC que forneceu o material para o desenvolvimento do trabalho.

A todos do laboratório de Geotecnia por todo o apoio e carinho, em especial aos técnicos: Edu, Gil, Hélcio, Luizão, Luiz Mário, Maria da Glória, Mauro, Serginho e Salviano. Agradeço aos amigos Petrônio, Harley, Ronaldo e Mário pela ajuda em diversos momentos da dissertação.

Não poderia esquecer os meus amigos de turma, por isso meus sinceros agradecimentos ao Diego, Evandro, Marcio, Silvana, Alexandre, Magnos e Débora. Sem vocês tenho certeza que o mestrado seria muito mais difícil. Em especial quero agradecer a Danielle pelos diversos momentos vividos, pelos obstáculos vencidos e vitórias conquistadas, enfim, pela amizade e companheirismo ao longo desta jornada.

Quero agradecer a todos da secretaria da Geotecnia e da secretaria acadêmica do Programa de Engenharia Civil por serem solícitos a qualquer momento.

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

A cada pessoa que contribuiu de alguma forma na minha pesquisa e na minha vida como toda, gostaria de agradecer citando uma crônica de Martha Medeiros: “Em tempos em que quase ninguém se olha nos olhos, em que a maioria das pessoas pouco se interessa pelo que não lhe diz respeito, só mesmo agradecendo àqueles que percebem nossas descrenças, indecisões, suspeitas, tudo o que nos paralisa, e gastam um pouco da sua energia conosco, insistindo”. Obrigada!

Beatriz Triane

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

## AValiação GEOTÉCNICA DO DESEMPENHO DE COBERTURA SECA EM BARREIRA CAPILAR DUPLA EM REJEITO DE MINERAÇÃO

Beatriz Pereira Triane

Julho/2010

Orientadores: Maria Claudia Barbosa

Anderson Borghetti Soares

Programa: Engenharia Civil

O presente trabalho tem por objetivo fazer uma avaliação geotécnica do desempenho de uma cobertura seca tipo barreira capilar dupla sobre rejeitos de carvão (piritosos) na minimização dos efeitos da drenagem ácida de minas. Foram analisados dados de sucção e umidade, nas camadas de rejeito/cobertura, e dados climatológicos de uma estação meteorológica, de modelos físicos que simulam sistemas do tipo cobertura-rejeito. Estes modelos fazem parte de uma estação experimental implantada em área de mineração de carvão pertencente à empresa Carbonífera Criciúma S.A, em Forquilha, SC (ano de 2008). Os dados foram divididos em dois períodos: - seco e úmido, considerando os sistemas rejeito-cobertura: (i) rejeito sem cobertura e (ii) rejeito com cobertura tipo barreira capilar dupla. Através de modelagem numérica, utilizando o programa VADOSE/W simulou-se o balanço hídrico dos casos estudados, comparando os resultados das modelagens com os dados experimentais de campo. Os resultados obtidos em campo e pela modelagem numérica indicaram a eficácia do uso da barreira capilar dupla como material de cobertura na região estudada, através da diminuição do fluxo de água e oxigênio para dentro do rejeito tanto em período seco quanto no úmido, apresentando um bom desempenho para a mitigação dos efeitos da drenagem ácida de minas.

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

GEOTECHNICAL EVALUATION OF PERFORMANCE OF DRY COVER IN  
DOUBLE CAPILARY BARRIER IN MINE WASTE

Beatriz Pereira Triane

July/2010

Advisors: Maria Claudia Barbosa  
Anderson Borghetti Soares

Department: Civil Engineering

This study concerns on geotechnical assessment of the performance of a double capillary barrier dry cover on coal waste (pyritic) for minimizing generation of acid mine drainage. Data suction and water content in the layers of waste / coverage and also climatic data from a weather station were analyzed from physical models that simulate coverage-waste systems. These models are part of an experimental station deployed in a coal mining area belonging to Carbonífera Criciúma S.A, in Forquilha, SC (year 2008). The data were divided into two periods (dry and wet), and also considering the coverage-waste systems: (i) waste with no cover and (ii) waste with a double capillary barrier cover. The water balance of the cases studied was simulated through numerical modeling, using VADOSE/W software, and its results were compared with field experimental data. The results obtained in the field and through numerical modeling indicated the efficacy of double capillary barrier as cover material in the study area by reducing the flow of water and oxygen into the waste in both the dry and humid periods, showing a good performance to mitigate the effects of acid mine drainage.

# SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO .....	1
1.1– Objetivos .....	3
1.2 – Estrutura da dissertação .....	4
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....	5
2.1 – Drenagem Ácida de Minas.....	5
2.2 – Conceitos de fluxo de água na condição não saturada.....	7
2.2.1 – Componentes do potencial da água no solo .....	8
2.2.2 – Sucção .....	9
2.2.3 – Curva de Retenção de Água.....	11
2.2.3.1 – Ajuste da Curva de retenção .....	13
2.2.4 – Condutividade hidráulica em meio não saturado .....	15
2.3 – Balanço Hídrico .....	17
2.4 – Sistemas de cobertura seca de rejeitos .....	20
2.4.1 – Configuração da cobertura .....	21
2.4.2 – Comportamento hidrológico .....	22
CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	25
3.1 – Características do local .....	25
3.2 – Estação Experimental.....	27
CAPÍTULO 4: METODOLOGIA.....	40
4.1 – Dados da Estação Experimental.....	40
4.2 – Material utilizado nos ensaios: rejeito grosso .....	42
4.3 – Ensaio da Placa de Sucção .....	43
4.3.1 – Metodologia do ensaio .....	45
4.4 – Modelagem numérica.....	53
4.4.1 – Programa VADOSE.....	53
4.4.2 – Modelo utilizado .....	55
CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	58
5.1 – Ensaio da Placa de Sucção .....	58

5.2 – Análise dos dados da estação experimental .....	62
5.1.1 – Período Seco .....	64
5.1.2 – Período Úmido .....	69
CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....	74
6.1 – Dados de entrada do modelo .....	74
6.2 – Resultados da modelagem.....	80
6.2.1 – Mês de Julho de 2008 .....	80
6.2.2 – Mês de Outubro de 2008 .....	86
6.3 – Comparação entre os resultados de campo e modelagem.....	92
6.4 – Considerações finais.....	97
CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	99
7.1 – Considerações finais sobre o estudo realizado.....	99
7.2 – Sugestões para pesquisas futuras .....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	102
ANEXO I: Ensaio da Placa de Sucção .....	111
ANEXO II: Imagens do programa Vadose.....	115

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Elemento de solo não saturado (modificado a partir de FREDLUND E RAHARDJO, 1993) .....	8
Figura 2.2: Curva de retenção típica e principais componentes (FREDLUND & XING, 1994) .....	12
Figura 2.3: Desenho da classificação do solo não saturado proposta por WROTHE e HOUSLSBY (1985). (a) estágio de baixo grau de saturação; (b) estágio de grau de saturação intermediário e (c) estágio elevado grau saturação .....	15
Figura 2.4: Esquema de sistema de cobertura seca tipo barreira capilar. a) Esquema de barreira capilar simples; b) Esquema de barreira capilar Dupla (UBALDO, 2005) .....	21
Figura 3.1: Localização da Região Carbonífera Sul Catarinense em destaque .....	25
Figura 3.2: Visão geral da área do complexo mineiro Carbonífera Criciúma, Mina do Verdinho (modificado de Borghetti et al, 2009).....	27
Figura 3.3 – Etapas da construção da Estação Experimental. (a) Visão geral da Estação; (b) Abertura da Cava; (c) Colocação da geomembrana no fundo da cava; (d) Localização do sistema de drenagem no interior da cava; (e) Lisímetro; (f) Poço de coleta de drenagem interna e (g) Calhas para coleta de “run-off” .....	29
Figura 3.4: Curva de retenção dos materiais de cobertura .....	32
Figura 3.5: Configuração das camadas das células (Modificado de BORGHETTI SOARES <i>et al</i> , 2009) .....	33
Figura 3.6: Sistema de aquisição e instalação dos instrumentos nas camadas. (a) Sistema de aquisição dos dados; (b) Série de sensores no rejeito grosso; (c) Série de sensores na camada de rejeito misturado; (d) Série de sensores na camada de cinza; (e) Série de sensores na camada de argila; (f) Série de sensores na camada de solo orgânico.....	36
Figura 3.7: Sensor de sucção (bloco de gesso .....	37
Figura 3.8: Sensor de temperatura .....	37
Figura 3.9: Sensor de umidade .....	38
Figura 3.10: Estação Experimental concluída (Fonte: Borghetti <i>et al</i> , 2009) .....	39
Figura 4.1: Configuração da célula 1 e célula 2 (Fonte: BORGHETTI SOARES e SOUZA, 2007) .....	41
Figura 4.2: Material utilizado no ensaio. (a) rejeito grosso; (b) pilha de deposição dos rejeitos; (c) acondicionamento da amostra em bombona sem água .....	42
Figura 4.3: Base da placa de sucção .....	43
Figura 4.4: Esquema da base da placa de sucção .....	45
Figura 4.5: Haste metálica com o sistema de roldanas.....	46

Figura 4.6: Balança semi-analítica utilizada no ensaio da placa de sucção .....	46
Figura 4.7: Acessórios necessários para o ensaio. 1) Reservatório de água; 2) mangueira e 3) Conjunto Placa de sucção + balança semi-analítica.....	47
Figura 4.8: Sistema utilizado para saturação da placa de sucção com detalhe para as entradas da câmara utilizada.....	48
Figura 4.9: Corpo de prova moldado com ajuda de um anel de PVC, em detalhe o corpo de prova quase saturado.....	50
Figura 4.10: Precipitação de ferro oriundo do rejeito grosso .....	51
Figura 4.11: Pedra porosa com ácido oxálico 10% após alguns minutos .....	52
Figura 4.12: Procedimento de limpeza da pedra porosa com a utilização de uma bomba para aplicação de vácuo.....	53
Figura 4.13: Modelos utilizados para simulação numérica com as condições de contorno. (a) Modelo para o caso 1 (rejeito sem cobertura); (b) Modelo para o caso 2 (rejeito com cobertura tipo barreira capilar dupla) .....	56
Figura 5.1: Ensaio da Placa de sucção. (a) sucção mátrica x teor de umidade volumétrico; (b) sucção mátrica x teor de umidade gravimétrico e (c) sucção mátrica x grau de saturação .....	59
Figura 5.2: Curva de retenção ajustada do rejeito grosso.....	61
Figura 5.3: Foto com zoom macro do rejeito grosso após lavagem e secagem ao ar.....	61
Figura 5.4: Precipitação do ano de 2008 (Fonte: Estação Meteorológica da estação experimental .....	63
Figura 5.5: Configuração das células 1 e 4 da estação experimental (Modificado de BORGHETTI SOARES <i>et al.</i> , 2009).....	63
Figura 5.6: Dados da estação do período seco. (a) Precipitação do período; (b) umidade célula 1 e (c) sucção célula 1 .....	64
Figura 5.7: Dados da estação do período seco. (a) Precipitação do período; (b) umidade célula 4 e (c) sucção célula 4 .....	65
Figura 5.8: Carga total da célula 4 no período seco de 2008.....	68
Figura 5.9: Dados da estação do período úmido. (a) Precipitação do período; (b) umidade célula 1 e (c) sucção célula 1 .....	70
Figura 5.10: Dados da estação do período úmido. (a) Precipitação do período; (b) umidade célula 4; (c) sucção célula 4 .....	71
Figura 5.11: Carga total da célula 4 no período úmido de 2008. ....	73
Figura 6.1: Curva de retenção solo-água dos materiais estudados .....	75
Figura 6.2: Condutividade hidráulica não saturada dos materiais.....	76
Figura 6.3: Condições iniciais de sucção e condição de contorno climática para o caso 1 e para o caso 2 .....	77

Figura 6.4: Precipitação nos meses de Julho e Outubro de 2008 (Fonte: Estação Meteorológica da Estação Experimental) .....	80
Figura 6.5: Perfis de umidade e poropressão ao longo da elevação nos dias do mês de Julho para o caso 1. (a) Perfis de umidade; (b) Perfis de poropressões .....	81
Figura 6.6: Balanço hídrico (variação do volume de água) acumulado no rejeito sem cobertura (caso 1) .....	82
Figura 6.7: Camadas rejeito / cobertura representativas do caso 2 .....	83
Figura 6.8: Perfis de umidade e poropressão ao longo da elevação nos dias do mês de Julho para o caso 2. (a) Perfis de umidade; (b) Perfis de poropressões .....	83
Figura 6.9: Saturação da camada de argila para o caso 1 no mês de Julho de 2008 .....	85
Figura 6.10: Balanço hídrico (variação do volume de água) acumulado no rejeito com cobertura do tipo barreira capilar dupla (caso 2).....	86
Figura 6.12: Perfis de umidade e poropressão ao longo da elevação nos dias do mês de Outubro para o caso 1. (a) Perfis de umidade; (b) Perfis de poropressões.....	87
Figura 6.13: Balanço hídrico (variação do volume de água) acumulado no rejeito sem cobertura do (caso 1) .....	89
Figura 6.14: Perfis de umidade e poropressão ao longo da elevação nos dias do mês de Outubro para o caso 2. (a) Perfis de umidade; (b) Perfis de poropressões.....	89
Figura 6.15: Grau de saturação da camada argilosa em Julho e Outubro de 2008.....	91
Figura 6.16: Balanço hídrico (variação do volume de água) acumulado no rejeito com cobertura do tipo barreira capilar dupla (caso 2).....	92
Figura 6.16: Comparação dos resultados de teor de umidade para o caso 1. (a) Umidade do mês de Julho e (b) Umidade do mês de Outubro.....	93
Figura 6.17: Comparação dos resultados de poropressão para o caso 1. (a) Poropressões do mês de Julho e (b) Poropressões do mês de Outubro .....	94
Figura 6.18: Comparação dos resultados de teor de umidade para o caso 2. (a) Umidade do mês de Julho e (b) Umidade do mês de Outubro.....	95
Figura 6.19: Comparação dos resultados de Poropressão para o caso 2. (a) Poropressões do mês de Julho e (b) Poropressões do mês de Outubro .....	96

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Técnicas para medição de sucção em solo (Modificado de CARDOSO, 2006).....	11
Tabela 2.2 - Equações mais utilizadas para determinação de curva de retenção .....	14
Tabela 3.1 - Ensaio de caracterização (materiais de cobertura / rejeito) .....	30
Tabela 3.2 - Ensaio de permeabilidade .....	30
Tabela 3.3 - Parâmetros de compactação (materiais de cobertura) .....	31
Tabela 3.4: Posicionamento e quantidade dos instrumentos .....	35
Tabela 4.1: Densidades do rejeito grosso .....	49
Tabela 5.1: Índices físicos iniciais das amostras utilizadas nos ensaios .....	58
Tabela 5.2: Parâmetros estimados graficamente para ajuste de curva de retenção para os ensaios .....	60
Tabela 6.1: Condutividade hidráulica saturada dos materiais estudados .....	75
Tabela 6.2 Dados de entrada para a condição Inicial de contorno .....	78
Tabela 6.3: Dados climáticos do mês de Julho de 2008.....	78
Tabela 6.4: Dados climáticos de Outubro de 2008.....	79
Tabela 6.5: Dias selecionados e suas respectivas precipitações no ano de 2008 .....	93

# ÍNDICE DE SIGLAS E SÍMBOLOS

CANMET – Canada Centre for Mineral and Energy Technology

CETEM - Centro de Tecnologia Mineral

CL – Argila de baixa compressibilidade (SUCS)

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

DAM - drenagem ácida de minas

EPA- Environmental Protection Agency

EPAGRI – Estação Experimental de Urussanga

Eh – Potencial redox

GC - pedregulho com finos (SUCS)

GW - pedregulho bem graduado (SUCS)

$h_i$  – umidade inicial

$h_f$  – umidade final

MEV - microscópio eletrônico de varredura

SIECSC- Sindicato da Indústria Extrativa do Carvão do Estado de Santa Catarina

SUCS - sistema unificado de classificação de solos

e - índice de vazios

$e_o$  - índice de vazios inicial

$G_s$  - densidade real dos grãos

K - coeficiente de permeabilidade

$K(\Psi)$  - permeabilidade não saturada

kPa – quilo Pascal,

$K_{sat}$  - coeficiente de permeabilidade saturada

LP - Limite de Plasticidade

$m$  - parâmetro de ajuste da equação VAN GENUCHTEN (1980)

$n$  - parâmetro de ajuste da equação VAN GENUCHTEN (1980)

$n$  - porosidade total

$P_m$  - Potencial mátrico da água no solo

$P_{os}$  - Potencial osmótico da água no solo

$P_p$  - Potencial de pressão da água no solo

$P_t$  - Potencial total da água no solo

$S$  - grau de saturação

$u_{ar}$  - pressão do ar

$u_w$  - pressão da água

$\alpha$  - parâmetro de ajuste da equação VAN GENUCHTEN (1980)

$\Theta$  - teor de umidade normalizado (adimensional)

$\Psi$  - sucção

$\gamma_{d(máxima)}$  – peso específico aparente seco

$\gamma_s$  – peso específico real dos grãos

$\theta$  - teor de umidade volumétrico

$\theta_r$  – teor de umidade volumétrico residual

$\rho_s$  - massa específica aparente seca

$\theta_s$  - teor de umidade volumétrico saturado

$\omega$  - teor de umidade gravimétrico

$\psi$  - Sucção total

$\psi_m$  – Sucção matricial

$\psi_{os}$  - Sucção osmótica

# CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

O Brasil está entre os países com maior potencial mineral do mundo, e sua história tem íntima relação com a busca e o aproveitamento dos seus recursos minerais, que sempre contribuíram com importantes insumos para a economia nacional, fazendo parte da ocupação territorial e da história nacional.

O carvão mineral brasileiro é utilizado, há muitos anos, para fins metalúrgicos e energéticos, e a exploração intensificou-se a partir da instalação da siderurgia e de usinas termoelétricas no país quando o presidente Getúlio Vargas impôs a obrigatoriedade da mistura do carvão nacional ao importado.

No entanto, com a retirada da obrigatoriedade, em 1990, o carvão metalúrgico brasileiro não conseguiu se estabelecer devido à sua baixa competitividade em relação ao carvão metalúrgico importado, pois era beneficiado com baixo rendimento e gerava grande volume de resíduos (CETEM, 2001).

As principais reservas nacionais de carvão mineral estão localizadas no Sul do País, concentradas no flanco leste da Bacia do Paraná, compreendendo uma faixa que se estende por 1.500 km, pelos estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Em Santa Catarina, o carvão ocorre na bacia Sul - Catarinense, indo de sul para norte do município de Araranguá ao de Lauro Müller, e atualmente é responsável por 50% da produção na Usina Termoelétrica Jorge Lacerda, de forma beneficiada.

Todavia, a utilização do carvão nacional sofre limitações quanto ao uso intensivo devido ao baixo *rank* e *grade*<sup>1</sup>, às pequenas jazidas e às camadas finas e irregulares que dificultam a produção em larga escala e tornam os preços pouco competitivos. Além disso, o carvão nacional contém alto teor de enxofre e cinzas (BORBA, 2001).

A atividade de mineração também acarreta grandes impactos ambientais e dentre eles está a poluição oriunda da drenagem ácida de minas (DAM) gerada nas frentes de lavra superficial e subterrânea, nas pilhas de resíduos e nas lagoas de decantação em função da mineralogia das rochas presentes e da disponibilidade de água e oxigênio no sistema.

---

<sup>1</sup> Rank: grau de carbonificação atingido pela camada carbonífera e Grade: percentual de matéria mineral incombustível (cinzas) presente na camada carbonífera. Um baixo *grade* significa que o carvão possui alto percentual de cinza misturado à matéria carbonífera (BORBA, 2001)

## CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

No que tange à drenagem ácida de minas deve-se ressaltar que os impactos não se restringem à área mineirada, podendo atingir corpos hídricos superficiais e subterrâneos distantes do empreendimento. Além disso, as reações químicas envolvidas no processo usualmente ocorrem durante anos e mesmo depois de esgotado o depósito mineral, e a contaminação inviabiliza o uso da água para fins recreativos, agrícolas e de consumo (BARBOSA et al., 2001). Os impactos ocasionados pela DAM são: acidificação das águas superficiais, redução da produtividade biológica dos rios, aumento da concentração de metais nas águas dos rios e contaminação das águas subterrâneas (CETEM, 2001).

Na região sul do país, principalmente no estado de Santa Catarina, os rejeitos gerados nos pré-lavadores foram sendo depositados próximos à fonte de água. Esta prática mineira sem maiores cuidados com o meio ambiente foi a principal causa da poluição dos recursos hídricos da região (ALEXANDRE & KREBS, 1995). Segundo MITSUBISHI CORP *et al* (1997), a área comprometida corresponde na Bacia de Araranguá a 2,9 mil hectares, 1,2 mil hectares na Bacia de Tubarão e 0,6 mil hectares em Urussanga.

No ano de 2000, os mineradores de carvão de Santa Catarina foram condenados em Sentença da Justiça Federal a promover toda a recuperação ambiental da região afetada pela mineração de carvão no prazo de três anos (FARIAS 2002). Com o objetivo de atender à sentença foram e estão sendo desenvolvidos estudos e trabalhos de recuperação ambiental, entre os quais se encontra o Projeto Conceitual para Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Catarinense (2001), elaborado pelo CETEM (Centro de Tecnologia Mineral), CANMET (Canadá Centre for Mineral and Energy Technology) e SIECESC (Sindicato da Indústria de Carvão do Estado de Santa Catarina).

Em uma das metas do projeto, o CETEM propôs avaliar o uso de coberturas secas para minimização da geração de drenagem ácida nas pilhas de resíduos. Assim, foi projetada uma estação experimental com coberturas compostas por materiais disponíveis na região de estudo. O objetivo das coberturas é inibir a entrada de oxigênio e água, principais agentes na geração da DAM. Uma das configurações de cobertura proposta foi estudada anteriormente em uma dissertação de mestrado da COPPE (UBALDO, 2005).

## 1.1– Objetivo

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral fazer uma avaliação geotécnica do desempenho de cobertura seca tipo barreira capilar dupla em rejeitos piritosos para controle da geração de drenagem ácida a partir dos dados de uma estação experimental projetada pelo CETEM e implantada em outubro de 2007 em uma área da Carbonífera Criciúma S.A. em Forquilha, SC.

Para se alcançar o objetivo geral proposto, alguns objetivos específicos foram estabelecidos, tais como:

- Analisar os dados diários de umidade e de sucção oriundos da estação experimental;
- Analisar os dados de precipitação obtidos por uma estação meteorológica instalada na estação experimental;
- Analisar por meio de simulação numérica o balanço hídrico do sistema de cobertura / rejeito, além de fazer uma comparação entre os dados de campo com os obtidos na modelagem.

Tanto para as análises dos dados experimentais de campo quanto para simulação numérica, é necessário o conhecimento da curva de retenção de água do rejeito grosso. No projeto das coberturas da estação experimental foram utilizadas curvas teóricas para representar este parâmetro, no entanto, estas curvas podem não representar o real comportamento do material (rejeito) quanto ao fluxo de água. Um dos objetivos específicos desta dissertação é obter uma curva de retenção de água para o rejeito. Para se alcançar este objetivo, o presente trabalho utilizará um sistema denominado Placa de sucção que permite aplicar sucções de até 30 kPa, que é o intervalo de sucções de maior interesse para a faixa granulométrica do rejeito grosso.

## 1.2– Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta de sete capítulos e três anexos. O capítulo 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica de temas como drenagem ácida de minas, sistema de coberturas secas de rejeitos, alguns fundamentos sobre solos não saturados evidenciando o potencial de água no solo, conceito de sucção, curva de retenção de água e o fluxo em meio não saturado.

O capítulo 3 descreve e caracteriza a área onde está inserida a estação experimental, e também descreve o seu projeto, etapas de construção e dados monitorados.

O capítulo 4 apresenta a metodologia utilizada para se alcançar os objetivos propostos, descrevendo assim os dados da estação experimental utilizados, o método do ensaio da Placa de sucção e a metodologia e modelo utilizados para a simulação numérica com o programa Vadose/W.

O capítulo 5 aborda a análise e discussão dos resultados obtidos dos dados de campo e do ensaio realizado em laboratório.

No capítulo 6 são apresentados os dados sobre a modelagem numérica, assim como os resultados obtidos. Neste capítulo também são confrontados os resultados obtidos em campo e os dados da simulação.

No último capítulo serão feitas as considerações finais dos resultados obtidos tanto na análise dos dados experimentais de campo e de laboratório como dos resultados obtidos na modelagem, buscando-se concluir os estudos e apresentar sugestões e propostas para pesquisas futuras.

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 – Drenagem Ácida de Minas (DAM)

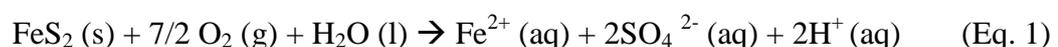
A DAM é um problema ambiental capaz de comprometer a qualidade dos recursos hídricos da região onde ocorre. O processo inicia-se quando materiais que contêm minerais sulfetados (pirita, por exemplo) são expostos ao oxigênio e à água, gerando um efluente ácido com elevadas concentrações de sulfato e íons metálicos dissolvidos que são posteriormente liberados no meio ambiente. Geralmente estas soluções aquosas são drenadas para os corpos hídricos (lagos, rios, etc.), comprometendo seu ecossistema, visto que a diminuição do pH das águas que percolam aumentam o potencial de solubilização dos metais pesados.

Segundo EPA (1994), a geração de acidez das pilhas de estéreis e lagoas de decantação é caracterizada pela presença de sulfetos, tamanho e forma das partículas acidificante e neutralizadora, variação do pH, oxidação, entrada de oxigênio, presença de bactérias e liberação da DAM. Todavia, segundo o trabalho, a taxa de oxidação varia de acordo com a cristalinidade e pureza de cada mineral sulfetado.

Muito embora a drenagem ácida seja mais comumente associada à mineração de carvão, o problema também pode ocorrer associado a outros sulfetos metálicos, como na mineração de Urânio (SOUZA, 1995; e LEONI, 1999) e em dragagem de sedimentos (BORMA, 1998).

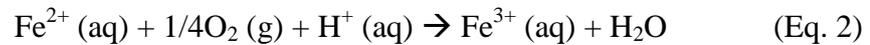
O grau e intensidade da ação da água e do oxigênio sobre um corpo mineral dependem de uma série de fatores importantes, tais como influência hidrogeológica e geológica, dados meteorológicos; desempenho do tipo de bactéria presente e população dos microorganismos e caracterização mineralógica (EPA, 1994, e outros).

A pirita ( $\text{FeS}_2$ ) é o principal mineral sulfetado encontrado em minerais carboníferos capaz de produzir drenagem ácida, embora outros sulfetos de menor ocorrência possam também contribuir para o processo. A reação se inicia com a oxidação do sulfeto de ferro (pirita) pelo  $\text{O}_2$  atmosférico e pela água, produzindo sulfato,  $\text{Fe}^{2+}$  e ácido sulfúrico em solução, conforme apresentado a seguir (SINGER e STUMM (1970) *apud* GUEVARA (2007)):

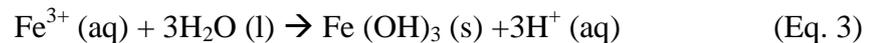


## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

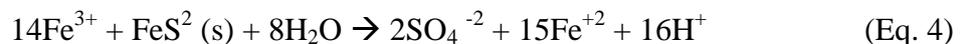
De acordo com a Equação 2, o íon  $\text{Fe}^{2+}$  (íon ferroso) produzido na primeira equação oxida-se para  $\text{Fe}^{3+}$  (íon férrico) na presença de oxigênio dissolvido na água ou do oxigênio do ar, sendo parte da acidez gerada na Equação 1 consumida nesta equação.



O íon férrico produzido por meio da Equação 2 precipita-se sob a forma de hidróxido de ferro  $\text{Fe} (\text{OH})_3$  (Equação 3), que é responsável pela cor vermelho-alaranjada que caracteriza a drenagem ácida de minas.



A reação de hidrólise do  $\text{Fe}^{3+}$  (equação 3), geralmente, ocorre nos estágios iniciais da oxidação da pirita. À medida que há acúmulo de acidez no meio e o pH diminui. A valores menores que 3,5, a reação de hidrólise se limita, aumentando de maneira significativa a concentração de  $\text{Fe}^{3+}$ . Uma vez que os produtos da oxidação estão em solução, eles podem reagir com a pirita para produzir mais íons ferrosos e acidez (Equação 4).



Quando o íon ferroso é produzido (Equação 4) e o oxigênio dissolvido é suficiente, ocorre um novo ciclo com as Equações 2 e 3 tornando as reações cíclicas. O oxigênio dissolvido e o íon férrico têm o poder de oxidar a pirita, reduzir o pH e gerar íon ferroso como demonstrado na Equação 4.

No entanto, quando o pH do meio é suficientemente ácido, o  $\text{Fe}^{3+}$  passa a ser o principal agente oxidante da pirita sendo reduzido a  $\text{Fe}^{2+}$ , e o  $\text{O}_2$  passa a ter um papel indireto na re-oxidação de  $\text{Fe}^{2+}$ , regenerando  $\text{Fe}^{3+}$ , conforme mostrado na equação 2.

A presença da bactéria autotrófica *Thiobacillus ferrooxidans* e outras espécies similares têm a capacidade de catalisar a reação de  $\text{Fe}^{2+}$  para  $\text{Fe}^{3+}$  (equação 2), principalmente em condições ácidas ( $\text{pH} < 3,5$ ) e aeróbias (OKEREKE & STEVENS, 1991). Essas bactérias aceleram a reação porque a taxa de oxidação do  $\text{Fe}^{2+}$  para o  $\text{Fe}^{3+}$  realizada pelas bactérias é mais rápida do que a reação inorgânica, e a taxa de oxidação da pirita pelo  $\text{Fe}^{3+}$  é mais rápida do que pela reação com o oxigênio.

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desta forma, resume-se que o processo reacional é lento, ocorre em várias etapas e sofre influência da atividade bacteriana, das características do resíduo, das características dos agentes abióticos (oxigênio e íon férrico), da temperatura, do pH, do Potencial redox (Eh), entre outros.

Além disso, é de suma importância ressaltar que os produtos solúveis da oxidação da pirita são removidos pela água. Na ausência de materiais alcalinos, as reações de produção de ácidos podem prosseguir por períodos de tempo indefinidos.

Com isso, a concentração de íons metálicos em suspensão ou dissolvidos na água é avaliada como risco à saúde humana (CONAMA N° 357, 2005), à medida que estão disponibilizados na água e no solo metais pesados como Fe, Al, Cd, Hg, Mn e Zn.

Uma das soluções muito utilizadas na prevenção e controle da DAM é o uso de sistemas de cobertura que envolve a submersão ou inundação dos rejeitos denominados coberturas úmidas e coberturas secas constituídas por camada de solos e/ou materiais compactados sobre o rejeito.

As coberturas secas têm a função de minimizar a entrada dos principais agentes responsáveis pelo processo de oxidação, o oxigênio e a água, e, por isso, o uso de tais coberturas pode ser considerado um método de controle da drenagem ácida “na fonte” (SOUZA *et al.*, 2003).

As coberturas secas são classificadas de acordo com o papel que exercem na prevenção da DAM podendo ser uma barreira de transporte de oxigênio, barreira hidráulica, barreira capilar, barreira de consumo de oxigênio, barreira de inibição da reação (BORMA *et al.*, 2003). No presente trabalho, serão abordadas somente as barreiras capilares visto que estas são o foco do estudo.

### **2.2 – Conceitos de fluxo de água na condição não saturada**

Os princípios da Mecânica dos Solos Clássica foram desenvolvidos com ênfase em solos saturados ou secos, ou seja, solos formados por sistema bifásico (água e

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

sólidos). No entanto, em regiões de clima tropical e subtropical, como o Brasil, há significativa ocorrência de solos não saturados que envolvem análises mais complexas e de suma importância para a resolução de problemas geotécnicos e geoambientais.

Um solo não saturado apresenta concomitantemente ar e água em seus vazios, isto é, é um sistema trifásico composto por partículas minerais sólidas, água e ar. Entretanto, autores tais como FREDLUND e MORGENSTERN (1977) afirmam que o solo não saturado pode ser compreendido também por uma quarta fase de interação ar-água ou membrana contrátil (Figura 2.1).

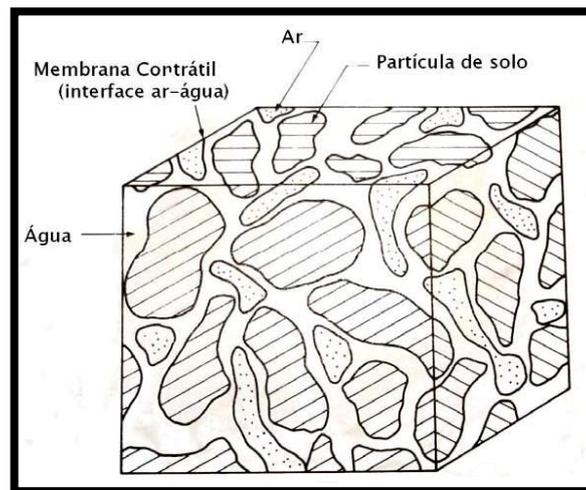


Figura 2.1: Elemento de solo não saturado (modificado a partir de FREDLUND E RAHARDJO, 1993)

### 2.2.1 – Componentes do Potencial da água no solo

O movimento hídrico é determinado pela sua energia, desta forma, a água move-se no sentido da maior para menor energia. Conhecendo os potenciais da água em diferentes pontos do solo, é possível determinar sua tendência de movimento através da diferença entre eles.

A energia cinética e a energia potencial são as duas principais formas de energia que existem. Como o movimento da água nas diferentes partes do sistema solo-água é, em geral, muito lento, a energia cinética pode ser considerada desprezível.

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O potencial total da água no solo ( $P_t$ ) pode ser definido como o trabalho realizado para conduzir um infinitesimal de água pura, isotérmica, isobárica e de forma reversível desde um ponto situado a uma altura conhecida, sob condição atmosférica, até um ponto considerado da água do solo. A equação 6 apresenta o potencial total da água no solo e seus componentes.

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

Onde:

- (a)  $P_g =$  Potencial gravitacional – Representa a energia que depende da posição na qual ela se encontra em relação a um plano referencial, tem valor zero no plano de referência, é positivo acima dele e negativo abaixo dele
- (b)  $P_{os} =$  Potencial osmótico – relacionado ao processo de difusão osmótica, onde os solutos, iônicos ou não, se movem em decorrência da sua atividade cinética. Esse potencial possui valores pequenos e exerce pouca influência no movimento da água no solo saturado ou próximo à saturação.
- (c)  $P_p =$  Potencial de pressão – 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. Quando o solo estiver na condição não saturada, o potencial mátrico passará a atuar no lugar do potencial de pressão.
- (d)  $P_m =$  Potencial matricial - representa a pressão negativa na água resultante do fenômeno da capilaridade e de forças de adsorção. Esta pressão é designada como sucção matricial.

### 2.2.2 – Sucção

A sucção é um dos parâmetros mais importantes para conhecimento do comportamento não saturado dos solos. Basicamente, é entendida como uma quantidade de energia que representa a capacidade do solo de reter água. Desta forma, para liberar a água adsorvida ou retida em um solo não saturado, uma energia externa tem que ser aplicada para contrapor-se à força de retenção do solo. A energia aplicada por unidade de volume de água é conhecida como sucção do solo (LEE e WRAY, 1995).

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A sucção total ( $\psi$ ) é definida como a soma da sucção matricial ( $\psi_m$ ) e da sucção osmótica ( $\psi_{os}$ ). A sucção matricial está relacionada às forças de capilaridade e adsorção originadas entre a água e a matriz do solo, ou seja, do tipo de partículas e seu arranjo estrutural. Já a sucção osmótica reflete a influência da presença de solutos na água do solo. A equação 7 apresenta as duas componentes da sucção total.

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

A sucção mátrica pode ser definida como a diferença entre a pressão do ar ( $u_{ar}$ ) e a pressão da água ( $u_w$ ) presente nos poros do solo. Se os vazios do solo estiverem em contato com a pressão atmosférica (considerada igual a zero como referência), a pressão do ar terá o mesmo valor que a pressão atmosférica. Com isso, a sucção matricial será representada pela pressão negativa da água nos poros.

A componente osmótica na maioria dos solos pode ser desprezada, em geral, uma vez que a umidade do solo não é muito baixa e a concentração salina é pouco significativa. Além disso, de acordo com REICHARDT (1985), o movimento hidráulico não apresenta mudança devido à sucção osmótica, a não ser que exista uma membrana semipermeável.

A forma mais convencional de se entender como é o comportamento de um determinado solo é conhecendo sua curva de retenção de água, que mostra muito do comportamento do material em relação ao desenvolvimento da sucção em função da quantidade de água presente (teor de umidade volumétrica e grau de saturação).

Na tentativa de se conseguir medir a sucção, diversas técnicas foram desenvolvidas, conforme a tabela 2.1. A técnica abordada no presente trabalho será a placa de sucção (detalhada no capítulo 4) por se tratar de um dos métodos que determina baixas sucções e pela praticidade devido às características do material estudado (rejeito grosso).

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

**Tabela 2.1 – Técnicas para medição de sucção em solo**

Técnica	Medida de sucção	Intervalo (kPa)	Tempo de equilíbrio
Psicrômetro	Total	100 a 71000	Minutos
Papel Filtro (com contato)	Mátrica	30 a 30000	7 dias
Papel Filtro (sem contato)	Total	400 a 30000	7 – 14 dias
Bloco poroso	Mátrica	30 a 30000	Semanas
Sensor de condutividade térmica	Mátrica	0 a 300	Semanas
Placa de sucção	Mátrica	0 a 90	Horas
Placa de pressão	Mátrica	0 a 1500	Horas
Tensiômetro padrão	Mátrica	0 a 100	Minutos
Tensiômetro osmótico	Mátrica	0 a 1500	Horas
Tensiômetro tipo Imperial College	Mátrica	0 a 1800	Minutos

Fonte: Modificado de CARDOSO JR (2006)

### 2.2.3 – Curva de retenção de água

A curva de retenção de água, também conhecida como curva característica mostra a variação da sucção com o teor de água presente no solo (figura 2.2). A umidade pode ser expressa em termos de teor de umidade volumétrico ( $\theta$ ), teor de umidade gravimétrico ( $\omega$ ) ou grau de saturação ( $S$ ). Desta forma, essa curva representa uma função que correlaciona a quantidade de água dentro dos poros do solo com a energia necessária para sua retirada (sucção).

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A sucção expressa na curva de retenção pode ser a sucção mátrica, estabelecida pela diferença entre as pressões na água e no ar contido nos vazios ( $u_w - u_a$ ) ou pode incorporar a parcela de sucção osmótica (sucção total).

As curvas de retenção podem ser obtidas por secagem ou umedecimento, e estas curvas não são iguais, pois, em geral, a umidade do solo para uma dada sucção é maior no processo de secagem do que no de umedecimento. A diferença entre a curva de retenção por secagem e por umedecimento é chamada histerese. Além disso, a forma da curva depende fundamentalmente da história de tensões à qual a amostra foi submetida (MARINHO, 1994, e outros).

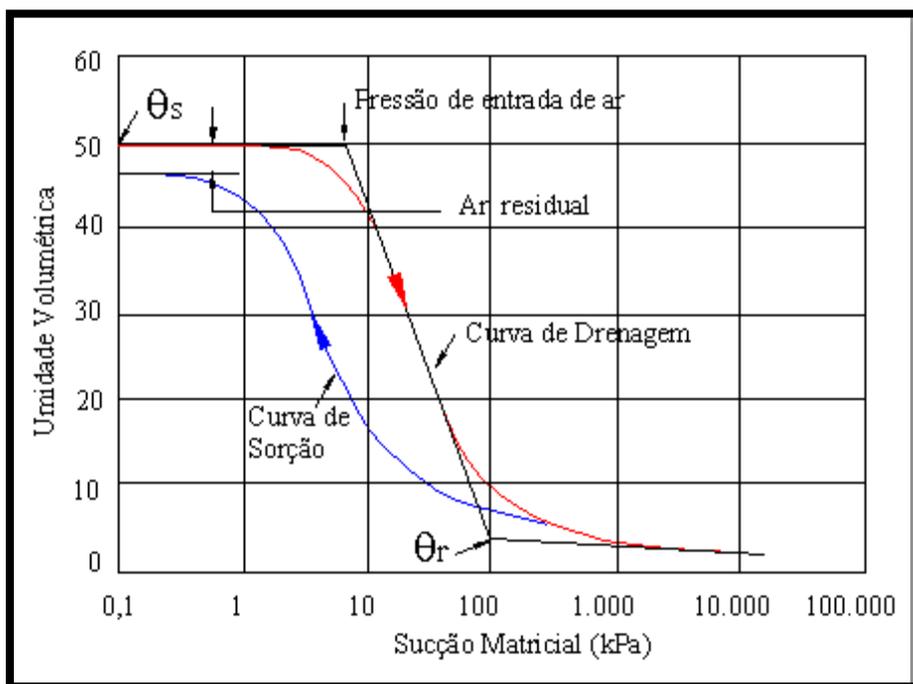


Figura 2.2: Curva de retenção típica e principais componentes (FREDLUND & XING, 1994)

A diferença entre as curvas do processo de secagem e o processo de umedecimento, a histerese, existe, pois na secagem a sucção é mantida na entrada do poro menor do solo estando o poro maior preenchido com água, a mesma sucção mantida no umedecimento está associada ao poro menor, ficando o interior com ar ocluído (TAYLOR, 1948).

A Figura 2.3 ilustra os parâmetros possíveis de serem obtidos de uma curva de retenção onde:  $\theta_s$  – teor de umidade volumétrica saturado;  $\theta_r$  – teor umidade volumétrica residual, ponto no qual a água somente sai do solo sob a forma de vapor, ou seja, qualquer acréscimo na sucção não gera uma variação significativa da umidade;

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Pressão de entrada de ar – valor de entrada de ar corresponde à sucção a partir da qual o ar no solo apresenta-se interconectado.

A curva de retenção reflete a influência do volume e distribuição dos poros e da estrutura dos solos sobre a relação sucção-umidade. Para baixos valores de sucção, o efeito capilar e a estrutura dos solos (distribuição dos poros) determinam a umidade presente no solo, já para valores elevados, a textura e a superfície específica têm uma influência maior, visto que a água pode ser considerada adsorvida às partículas sólidas (FREDLUND E XING, 1994).

### **2.2.3.1 – Ajuste da Curva de retenção de água no solo**

Na literatura é possível encontrar diversas equações utilizadas para representar a curva de retenção, no entanto, não existe nenhuma equação geral que represente a curva para todos os tipos de solo. Na Tabela 2.2 adaptada de OLIVEIRA (2004), CARDOSO JR (2006) e SILVA (2008), são apresentadas as expressões que costumam ser usadas para descrever a curva de retenção da água dos solos.

A maioria dos modelos para ajuste da curva de retenção baseia-se na interdependência entre a forma da curva e a distribuição do tamanho dos poros. Em geral, as equações surgiram baseadas nos resultados característicos de diversos solos e são de natureza empírica. As curvas, de acordo com LEONG e RAHARDJO (1997), podem ser classificadas em sigmoidais, quando apresentam os parâmetros  $\theta_s$ ,  $\theta_r$  e sucção de entrada de ar bem definidos, ou curvas sem estas características.

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

**Tabela 2.2 - Equações mais utilizadas para determinação de curva de retenção**

Autores	Equação	Parâmetros
BROOKS & COREY (1964)	$\theta = \left(\frac{\Psi_b}{\Psi}\right)^\lambda ; \theta \leq 1$	$\Psi_b \rightarrow$ Sucção correspondente a entrada de ar; $\Psi \rightarrow$ Sucção Matricial; $\lambda \rightarrow$ Parâmetro obtido graficamente (constante)
VAN GENUCHTEN (1980)	$\theta = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha \Psi)^n} \right]^m$	$\theta \rightarrow$ umidade normalizada $\Psi \rightarrow$ Sucção Matricial; $\alpha, m$ e $n \rightarrow$ Parâmetros de ajuste da curva $m = 1 - (1/n)$
FREDLUND & XING (1994)	$\theta = C(\Psi) \frac{\theta_s}{\ln \left[ e + \left(\frac{\Psi}{a}\right)^{n/m} \right]}$ $C(\Psi) = 1 - \left[ \frac{\ln \left( 1 + \frac{\Psi}{\Psi_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{10^6}{\Psi_r} \right)} \right]$	$\Psi \rightarrow$ Sucção Matricial; $\Psi_s \rightarrow$ sucção correspondente a umidade volumétrica residual $\theta_s \rightarrow$ Umidade volumétrica na saturação; $e \rightarrow$ número natural = 2,71828 $\alpha, m$ e $n \rightarrow$ Parâmetros de ajuste da curva $C(\Psi) \rightarrow$ fator de correção $10^6 \rightarrow$ valor limite de sucção para qualquer tipo de solo

As equações propostas por VAN GENUCHTEN (1980) e por FREDLUND e XING (1994) são amplamente utilizadas na literatura devido à sua versatilidade e por se ajustarem bem à maioria dos solos. Ambas as equações são baseadas na distribuição aleatória de poros interconectados, sendo que a função distribuição de poros proposta por FREDLUND e XING (1994) é uma modificação da proposta por VAN GENUCHTEN (1980) (LEONG e RAHARDJO, 1997).

Em geral, o parâmetro  $\alpha$  controla a posição de entrada de ar no ponto de inflexão da curva, o  $m$  está relacionado ao raio de curvatura no teor de umidade residual e o  $n$ , à inclinação do trecho linear da curva de retenção (VAN GENUCHTEN, 1980).

Neste trabalho adotou-se o uso de ajuste de curva característica pelo método de VAN GENUCHTEN (1980). Os parâmetros utilizados por essa equação foram obtidos através de um software computacional denominado RETC (RETention Curve), do

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Salinity Laboratory, USDA (VAN GENUCHTEN *et al.*, 1991), que utiliza o método dos mínimos quadrados.

### 2.2.4 – Condutividade hidráulica em meio não saturado

O conhecimento do coeficiente de condutividade hidráulica de um solo é de suma importância para análises de fluxo em questões geotécnicas e geoambientais. De acordo com CARDOSO JR & FUTAI (2005), “o fluxo de água através de um solo não saturado é governado pelas mesmas leis físicas que regem o fluxo no solo saturado”. A condutividade hidráulica não saturada é governada pela sucção e, portanto, influenciada pelo grau de saturação, pelo teor de umidade e pela porosidade do solo.

Para valores de saturação baixos, a fase gasosa é contínua e a fase líquida é descontínua, conforme figura 2.4 (a). Neste estágio a fase de ar se configura na forma de canais e a água forma meniscos ao redor dos pontos de contato dos grãos.

Com um grau de saturação intermediário, a fase de ar e de água é contínua, como apresenta a figura 2.4 (b). Na medida em que o grau de saturação aumenta, a fase líquida permanece contínua enquanto a fase de ar perde continuidade. Para graus de saturação mais elevados a fase de ar torna-se oclusa na água, como pode ser observado na figura 2.4 (c).

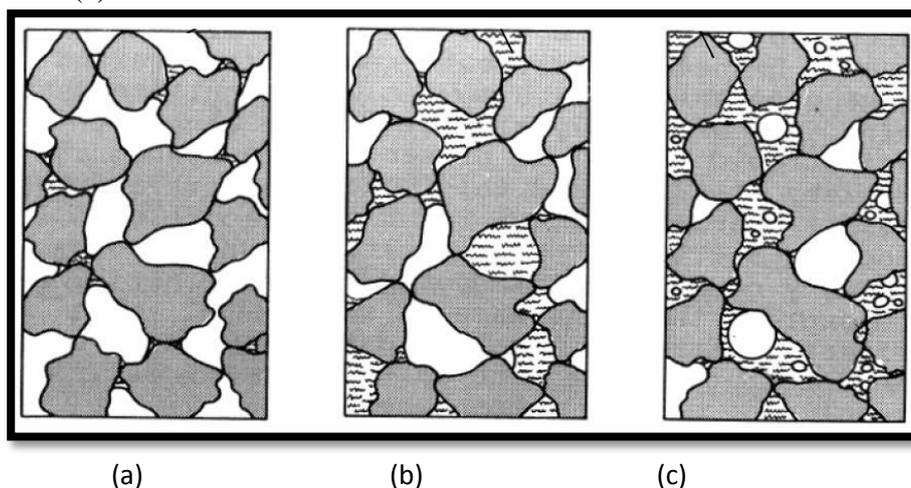


Figura 2.3: Desenho da classificação do solo não saturado proposta por WROTH e HOULSBY (1985). (a) estágio de baixo grau de saturação; (b) estágio de grau de saturação intermediário e (c) estágio elevado grau saturação.

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a obtenção da condutividade hidráulica em meio não saturado, existem algumas alternativas diretas, ou seja, método onde se determina o coeficiente de condutividade hidráulica por meio de ensaio de campo ou laboratório, e algumas alternativas indiretas, como a obtenção do coeficiente através de modelos de ajuste e/ou teóricos (FEUERHARMEL, 2007).

Os métodos diretos consomem tempo, são mais caros e não cobrem uma faixa relativamente grande se valores de sucção. Já os métodos indiretos permitem que a função condutividade hidráulica seja estimada mais facilmente, em escala maior com custo e tempo menores. No entanto, a formulação matemática e avaliação dos modelos matemáticos dependem de dados experimentais obtidos por medidas diretas e desta forma, a utilização de métodos indiretos não elimina a necessidade do uso de métodos diretos.

Nos métodos indiretos a modelagem envolve: equações empíricas que se ajustam aos dados experimentais obtidos, modelos macroscópicos e modelos estatísticos que utilizam o coeficiente de condutividade hidráulica saturado e a curva de retenção de água do solo para prever sua função condutividade não saturada.

Na presente dissertação, um método será abordado para calcular a condutividade hidráulica: FREDLUND *et al.* (1994). Essa equação foi utilizada no programa VADOSE/W para a modelagem numérica que prediz a condutividade hidráulica não saturada usando medida ou estimativa da função do conteúdo de água volumétrico ou da condutividade hidráulica saturada (GEO-SLOPE INTERNACIONAL, 2008).

O método de FREDLUND *et al.* (1994) permite calcular a condutividade hidráulica não saturada através da integração ao longo da curva inteira da função do teor de umidade volumétrica. A equação que rege este método é:

$$k_r(\Psi) = \frac{\int_{\ln(\Psi)}^b \frac{\Theta(e^y) - \Theta(\Psi)}{e^y} \Theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\Psi_{aev})}^b \frac{\Theta(e^y) - \Theta_s}{e^y} \Theta'(e^y) dy} \quad (\text{Eq. 13})$$

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Onde:

$k_r$  = Coeficiente de permeabilidade,

$\Psi_{aev}$  = Sucção correspondente ao valor de entrada de ar,

$b = \ln(1000000)$

$\Theta_s$  = Teor volumétrico de água,

$e$  = um numero natural (2,71828),

$y$  = uma variável de integração que representa o logaritmo da sucção,

$\psi$  = Sucção correspondente, e

$\Theta'$  = Primeira derivada da equação de FREDLUND e XING (1994) (tabela 2.2)  
para a curva de sucção

### 2.3 – Balanço Hídrico

O conceito de balanço hídrico é utilizado para a quantificação e estudo do fator hidrológico de uma região e foi introduzido por Thornthwaite em 1948. É entendido como o somatório das quantidades de água que entram e saem de um dado volume de solo em um dado intervalo de tempo. Desta forma, o balanço entre o volume de água que entrou e o que saiu num determinado volume representa a variação do armazenamento da água nesse volume.

Através do ciclo hidrológico é possível compreender a dinâmica dos processos hidrológicos e assim entender a circulação contínua da água, as suas transformações de estado e suas relações com o meio ambiente.

De acordo com REICHARDT (1990), o ciclo hidrológico pode ser dividido em duas fases principais: atmosférica e terrestre. A fase atmosférica consiste na formação das precipitações e a terrestre no armazenamento temporário de água, seus movimentos e transformações.

Em geral, o ciclo hidrológico compreende os seguintes fenômenos:

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- Precipitação (P): é a água proveniente do vapor d'água da atmosfera depositada na superfície terrestre de diversas formas: chuva, granizo, orvalho, neblina, neve e geada. No entanto, ao se falar no Brasil sobre precipitação, leva-se em conta, em geral, a precipitação sob a forma de chuva por ser a mais abundante.

- Interceptação: é a parcela da precipitação que é interceptada antes de atingir a superfície do solo. Esta interceptação pode ocorrer devido à presença de vegetação ou outros obstáculos.

- Retenção superficial (armazenamento) (Arm): é a parte do volume precipitado que atinge a superfície do solo e que fica retida nas pequenas e numerosas depressões do terreno, das quais só escapa por evaporação e/ou infiltração.

- Infiltração (I): é a passagem da água do meio atmosférico para o interior do solo através da interface ar-solo. A capacidade de infiltração de um determinado perfil de solo, dependente de diversos fatores, como teor inicial de umidade no solo, da textura e estrutura do solo (especialmente na camada superficial), assim como do tipo, intensidade e duração da precipitação. Quando a intensidade da chuva for menor que a capacidade de infiltração do solo, a água penetrará tão rapidamente quanto está sendo aplicada, a intensidade da chuva determinará a taxa de infiltração. Quando a taxa de chuva for superior à capacidade de infiltração, então a capacidade de infiltração determinará o fluxo e, portanto o processo começará a ser controlado pelo solo. De uma forma geral, a capacidade de infiltração é relativamente alta no início do processo e decresce gradualmente com o tempo.

- Escoamento superficial (runoff) (ES): é a água precipitada que não foi interceptada, não ficou retida e não infiltrou que passa a escoar sobre a superfície do solo. Este fenômeno acontece quando o solo atinge a saturação ou quando a intensidade da chuva é superior à velocidade de infiltração. Desta maneira, o escoamento superficial é dependente das condições climáticas assim como das condições fisiográficas da região.

- Evapotranspiração (Evp): é o processo pelo qual a água é transformada do estado líquido para o gasoso pelo processo de evaporação e de transpiração das plantas. Este fenômeno inclui a evaporação da água contida no solo, do orvalho, da parcela da precipitação interceptada e retida, bem como a transpiração das plantas. É um processo dependente da energia disponível para a mudança do estado físico da água, sendo,

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

portanto, a radiação solar o fator isolado mais importante. Outros fatores como vento, através da turbulência, e a umidade relativa do ar, através do potencial do vapor d'água, também afetam o processo.

A definição do balanço hídrico em sistemas de coberturas secas, especialmente, em barreiras capilares, é de suma importância, pois visa determinar a quantidade de água percolada na pilha de rejeito bem como a produção de efluente ácido gerado. Assim, é possível estimar a água infiltrada, geralmente, conforme a equação 14 abaixo:

$$I = P - ES - ETP - Arm \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde:

P → Precipitação

ES → Escoamento

ETP → Evapotranspiração

ARM → Armazenamento de água

De forma geral, o dimensionamento de um sistema de cobertura deve considerar o balanço hídrico visto que é através dele que se conhece e entende a interação das camadas de cobertura com a atmosfera, resultando na infiltração, no armazenamento e na retirada de água do sistema.

Neste contexto, estudos vêm sendo realizados, de forma expressiva, utilizando programas computacionais para compreender o fluxo de água nas camadas de cobertura de aterros, tais como WOYSHNER e YANFUL (1995), SOBRINHO (2000), LEONI (2001), DWYER (2003), UBALDO (2005), FAGUNDES (2005), COELHO *et al.* (2007), MATEUS (2008), SILVA (2008), BOHNHOFF *et al.* (2009), entre outros.

Todavia, a utilização deste tipo de ferramenta tem por objetivo representar de uma forma razoável o que acontece no solo e nas camadas de cobertura sob determinadas condições, e isto não significa que a simulação está correta e de acordo com a realidade (O'KANE *et al.*, 2002).

Os autores WOYSHNER e YANFUL (1995), simularam através de dois programas (HELP e SEEP/W) a dinâmica em um sistema de cobertura do tipo barreira capilar e constataram que os resultados obtidos na modelagem corroboraram com as medições experimentais de percolação e de teor de umidade obtidos em campo em um sistema de cobertura de rejeito. CHRISTOPH WELS e NEWMAN (2001) utilizaram os

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

programas SoilCover e SEEP/W para prever o desempenho de um sistema de cobertura de resíduos geradores de acidez, para regiões de climas áridos e semi-áridos e assim estimar a infiltração em variados sistemas de cobertura.

Ao compararem as performances de diferentes programas (HELP, HYDRUS-1D, SHW, SoilCover, SWIM, UNISATH e VS2DT) na simulação do balanço hídrico de cobertura do tipo barreira capilar de dados de monitoramento de campo no Texas - EUA, SCANLON *et al.* (2002), verificaram que, apesar da variedade e diferenças dos programas, os resultados da simulação da maioria dos programas foram semelhantes, e que o balanço hídrico gerado foi aproximado aos dados de campo. No entanto, as simulações apresentaram alguns problemas, principalmente, ligados a dificuldade em representar a realidade quanto às intensidades de precipitação e o escoamento superficial.

Outros estudos, como o de BUSSIÈRE *et al.* (1995) e LEONI (2001), verificaram que a utilização do programa SEEP/W é uma boa ferramenta para um melhor entendimento da dinâmica da água em sistemas de coberturas e, portanto, uma boa ferramenta para compreensão e predição do balanço hídrico.

### 2.4 – Sistemas de cobertura seca de rejeitos

De maneira geral, um sistema de cobertura seca é constituído por camadas de solos de diferentes propriedades e bem como outros tipos de materiais, como os geossintéticos ou resíduo (como cinzas oriundas de termoelétricas, por exemplo), desde que apresentem as propriedades necessárias para minimização da geração da DAM.

O objetivo principal das coberturas secas é minimizar/ mitigar a geração da drenagem ácida, através da formação de uma barreira (física ou química), que dificulta a entrada do oxigênio atmosférico e/ou da água de chuva no resíduo, diminuindo o processo de geração de acidez.

Desta forma, a barreira capilar é um tipo de cobertura composta por diferentes camadas de solos ou materiais alternativos com diferentes propriedades cuja função é

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

minimizar, simultaneamente, o fluxo de oxigênio (barreira ao transporte de oxigênio) e a entrada de água (barreira hidráulica).

### 2.4.1 – Configuração da cobertura

A base do funcionamento de uma barreira capilar é a superposição de camadas de solos ou material alternativo que possuam contraste de condutividade hidráulica não saturada (SHACKELFORD, 1997).

Na sua forma mais simples, uma barreira capilar é constituída por meio da colocação de uma camada de material fino sobre uma camada de material granular, ambos em condição não saturada, conforme a Figura 2.1 (a):

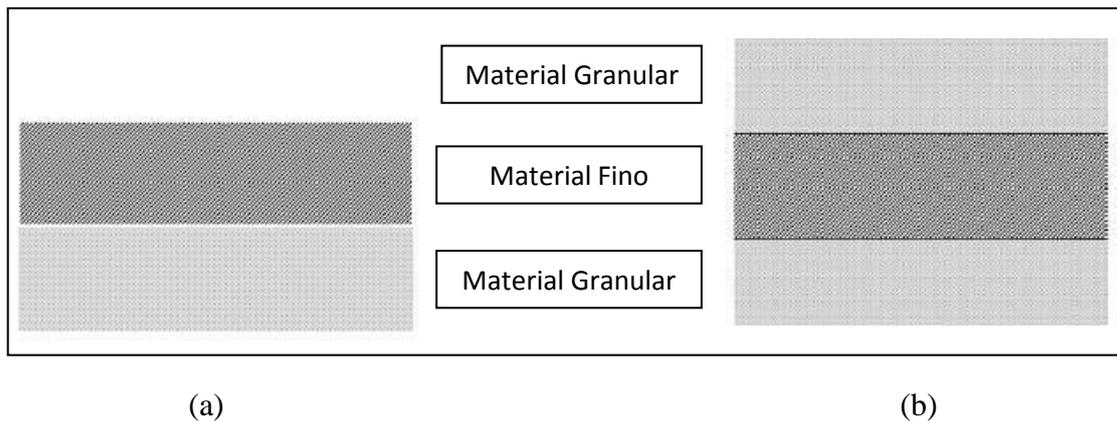


Figura 2.4: Esquema de sistema de cobertura seca tipo barreira capilar. a) Esquema de barreira capilar simples; b) Esquema de barreira capilar dupla (UBALDO, 2005).

Na condição não saturada, a camada com material fino tende a reter a água no seu interior devido à sucção. Por sua vez, a camada granular dificulta a percolação da água devido à sua baixa permeabilidade na condição não saturada, pois a presença de ar nos poros do material reduz a interligação dos vazios preenchidos por água. Assim, a água é impedida de percolar da camada fina para a camada granular, em direção ao rejeito.

Em climas úmidos, como a região de Santa Catarina no sul do Brasil, há períodos bem definidos de seca no inverno e elevada precipitação no verão e para que

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

haja um funcionamento satisfatório de uma barreira capilar, é necessário controlar ao mesmo tempo a secagem excessiva (evaporação) e a saturação excessiva da camada argilosa (BORMA *et al.*, 2003). Uma alternativa é a construção de uma barreira capilar dupla (Figura 2.1 (b)).

Este tipo de barreira é constituído por uma camada de material granular sobrejacente à camada com material fino, cuja função é:

- impedir, na época seca, que a água armazenada na camada argilosa migre por capilaridade, para as camadas de topo, minimizando os efeitos de perda de umidade por secagem e evaporação, e
- servir como um dreno, na época de chuva, conduzindo lateralmente a água que infiltra na cobertura e prevenindo, assim, a saturação da camada de material fino<sup>2</sup>.

Todavia, sobre a barreira capilar dupla é ideal adicionar-se ainda camadas que visam proteger a barreira capilar, fornecer suporte à vegetação e amortecer os efeitos de evapotranspiração e infiltração sobre a barreira (BORMA *et al.*, 2002).

### 2.4.1 – Comportamento Hidrológico

Diversos autores estudaram e obtiveram resultados positivos quanto à minimização da DAM através do sistema de cobertura seca tipo barreira capilar, tais como NICHOLSON *et al.* (1989); BARBOUR (1990); YANFUL *et al.* (1993); SWANSON (1995); WOYSHNER e YANFUL (1995) O’KANE (1996), SKOUSEN (2000), MAQSUD *et al.* (2005), entre outros.

A utilização de barreira capilar como alternativa no recobrimento de pilhas de estéreis e rejeitos piritoso de mineração vem sendo amplamente estudado e discutido em países como Canadá e Estados Unidos.

---

<sup>2</sup> O funcionamento da barreira como um dreno pode ser maximizado por meio da inclinação da superfície, favorecendo o escoamento lateral (BORMA *et al.*, 2002; SOUZA *et al.*, 2003).

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

YANFUL *et al.* (1993) e YANFUL *et al.* (1993-b), mostraram que o sistema de barreira capilar utilizado para cobrir rejeitos em New Brunswick no Canadá reduziu de 20% a concentração de oxigênio para menos de 3%, manteve o grau de saturação da camada fina elevado, reduziu a infiltração de água, reduziu a temperatura do rejeito, e reduziu pelo menos 90% a geração de drenagem ácida. Desta forma, estes resultados demonstram o bom desempenho da barreira capilar.

ADU-WUSU e YANFUL (2006) demonstraram, através do monitoramento de dados de coberturas secas sobre rejeitos de cobre em Ontário, Canadá, que a utilização de coberturas secas do tipo de barreira capilar melhora a qualidade do efluente gerado nas pilhas além de serem eficientes quanto à inibição da passagem de oxigênio para o interior da pilha. Os autores ainda afirmam que as condições climáticas são variáveis que influenciam no desempenho da cobertura e, por isso, devem ser estudadas e analisadas na construção de sistema de coberturas tipo barreira capilar.

No Brasil, especificamente na bacia Carbonífera Sul Catarinense, um estudo sobre o uso de cobertura seca sobre rejeito através de modelagem numérica foi realizada por MENDONÇA *et al.* (2003), cujo sistema de cobertura é constituído por uma camada compactada sobre o resíduo e recoberta com material não compactado (proposta por O’KANE *et al.* (2002). A avaliação feita no referido estudo foi realizada com o auxílio do programa SOILCOVER utilizando dados climáticos do ano de 2000 (Estação Urussanga) em quatro circunstâncias diferentes: i) resíduo sem cobertura; ii) cobertura com 30 cm de solo compactado e 30 cm de solo fofo sobre o rejeito; iii) cobertura com 60 cm de solo compactado e 30 cm de solo fofo sobre o rejeito, e iv) cobertura de 90 cm de solo compactado e 30 cm de solo fofo sobre o rejeito.

Com esta avaliação, os autores concluíram que todas as configurações com a camada de solo compactado apresentaram redução significativa da taxa de infiltração. No entanto, com relação à saturação média do sistema de cobertura no decorrer do ano, constataram que somente as configurações iii e iv apresentaram valores de redução da ordem de 84%, e que, apesar do acréscimo de espessura entre essas duas configurações, não houve um benefício significativo da cobertura com relação às características de infiltração e retenção.

UBALDO (2005) realizou simulações numéricas utilizando cinza de fundo da usina termelétrica de Jorge Lacerda-SC como material alternativo na cobertura de

## CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

depósitos de rejeitos de carvão, além de utilizar o programa SOILCOVER e os mesmos dados climáticos de MENDONÇA *et al.* (2003) para simular o desempenho das coberturas. A cinza seria utilizada em substituição da areia na barreira capilar, por ter um comportamento similar ao de um material granular, pois, neste caso, apresenta um contraste hidráulico com a camada argilosa.

Comparando as simulações entre uma cobertura simples de argila compactada e uma cobertura de barreira capilar dupla, UBALDO (2005) observou maior eficiência das barreiras capilares em relação à infiltração de água para o rejeito e que tanto a barreira capilar usando areia como usando cinza de fundo apresentaram um bom funcionamento em relação a minimizar a passagem de água e oxigênio para o interior da pilha de rejeito.

Em suma, os trabalhos realizados com barreira capilar para cobrir rejeitos demonstram que estas coberturas aumentam a retenção de água na camada argilosa e assim minimizam a passagem de oxigênio, diminuindo a geração da DAM. Porém, há necessidade de estudos aprofundados sobre as condições climáticas da região onde qualquer tipo de sistema de cobertura será implantado.

## CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo caracteriza a área de estudo quanto à sua posição geográfica, suas características climáticas, geomorfológicas e geológicas, bem como as principais características do processo de lavra e beneficiamento do carvão. Será também abordada a instalação, funcionamento e as características da Estação Experimental do projeto Unidade Piloto Instrumentada para Controle e Abatimento da DAM com o uso de coberturas secas (projeto coordenado pelo CETEM).

### 3.1 – Características do local

A área de estudo está inserida em uma das principais unidades mineiras em operação na Bacia Catarinense – a Unidade Mineira II – Verdinho da Carbonífera Criciúma SA. Este empreendimento está situado no município de Forquilha na Região Carbonífera do Estado de Santa Catarina a  $28^{\circ}47'47''$  S e  $49^{\circ}25'52''$  W, como apresenta a figura 3.1.

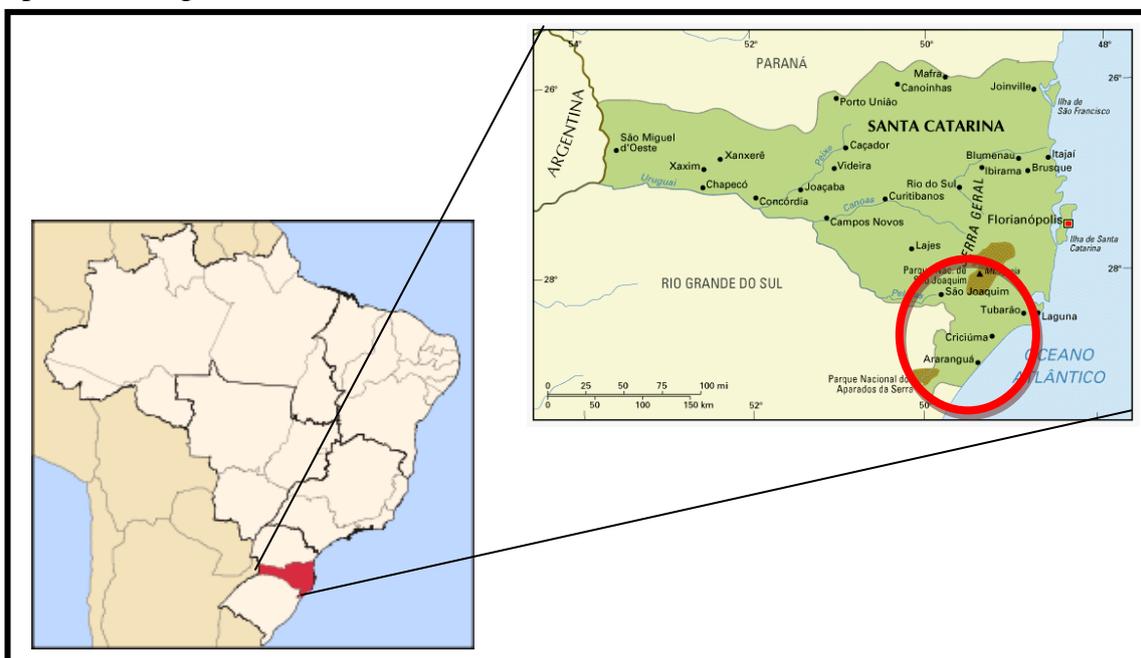


Figura 3.1: Localização da Região Carbonífera Sul Catarinense em destaque.

Em funcionamento desde 1982, a Unidade Mineira Verdinho ocupa uma área superficial de aproximadamente 150 hectares, caracterizada por um relevo suave associado às planícies aluviais, drenado por duas microbacias, dos rios Mãe Luzia e Sangão, tributários da Bacia Hidrográfica do rio Araranguá.

## CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O clima da região é classificado como “Cfa”, isto é, “clima subtropical úmido sem estação seca e com verão quente” (KÖPPEN, 1948), controlado por massas de ar de origem tropical marítima e polar marítima (CARUSO JÚNIOR, 1997).

O índice pluviométrico médio anual da região é de 1480 mm, apresentando as maiores médias mensais durante os meses de setembro a março e as menores nos meses de abril a agosto (EPAGRI – Estação Experimental de Urussanga). As temperaturas médias variam entre 23,5°C nos meses de janeiro e fevereiro e em torno de 14°C no mês de julho.

Com relação à geologia, a área de estudo está inserida no âmbito de depósitos sedimentares de idade Quaternária que, segundo MARTIN *et al* (1988), formam um extenso sistema de leques aluviais capeados por sedimentos argilosos associados à planície fluvial. De acordo com ABORRAGE e LOPES (1986), este pacote de deposição recente encontra-se sobre a Sequência Vulcano-Sedimentar da Bacia do Paraná que compreende siltitos e folhelhos formadores do grupo Passa Dois e o grupo Guatá onde se encontram os principais horizontes de carvão explorados comercialmente nesta região.

A unidade Mineira II – Verdinho explora a camada de carvão Barro Branco que apresenta um pacote tabular, de grande extensão lateral, posicionado entre 100 e 250 metros de profundidade. O complexo industrial compreende uma área de cerca de 1.200.000 m<sup>2</sup>, entre usina de beneficiamento, pátios de estocagem, módulos de estéreis, prédios de apoio, poços e plano inclinado. Os rejeitos sólidos são dispostos em local de relevo suave e de baixa declividade, delimitados por sistema de canais de captação periférica que possuem distâncias mínimas de 230 metros do rio Mãe Luzia e 326 metros do rio Sangão, posicionados respectivamente a oeste e leste da área (MENDONÇA, 2007).

Do processo de beneficiamento do carvão na unidade surgem dois tipos de rejeito: rejeito grosso, com granulometria mais grosseira na ordem de 37 a 25 mm; e rejeito fino, inferior a 1 mm (CETEM, 2007). Estes rejeitos são dispostos separadamente e de forma diferente: em um primeiro momento os rejeitos finos são depositados em bacias de decantação (Módulo A) e posteriormente retirados e colocados em depósitos / pilhas juntamente com os rejeitos grossos (Módulo B). A

## CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Figura 3.2 apresenta uma fotografia aérea da área do complexo com a distinção das áreas separadas para deposição dos rejeitos.



Figura 3.2: Visão geral da área do complexo mineiro Carbonífera Criciúma, Mina do Verdinho (modificado de BORGHETTI SOARES et al, 2009).

### 3.2 – Estação Experimental

Como já mencionado no Capítulo 2 do presente trabalho, a minimização do efeito da DAM pode ser feita com o uso de coberturas secas. A fim de se compreender a eficiência da utilização de sistemas de cobertura seca sobre rejeitos de carvão, o Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) implantou em 2007 uma Estação Experimental em uma área de mineração da Empresa Carbonífera Criciúma, conforme apresentado na figura 3.2, cuja função é estudar a influência de diferentes configurações de camadas de cobertura na minimização da DAM.

Para a instalação da unidade experimental foi construído um aterro de 3 metros de altura acima da cota da superfície, devido à presença de um lençol freático superficial (com cerca de 2 metros abaixo do nível do terreno). Neste aterro foram preparadas quatro cavas de mesma dimensão (Figura 3.3 (a) e (b)), na forma de troncos de pirâmides invertidos, com  $16\text{m}^2$  na cota de fundo ( $4 \times 4\text{m}$ ) e  $56,27\text{ m}^2$  na cota de superfície ( $7,5 \times 7,5\text{m}$ ), projetadas de acordo com simulações numéricas (SOUZA *et al.*, 2009. e BORGHETTI SOARES *et al.*, 2009).

## CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Na superfície do fundo das cava foi instalada uma manta impermeável (geomembrana de PVC - VINIMANTA) com geotêxtil de poliéster para impedir a contaminação do aterro pelo efluente percolado no rejeito e permitir a realização de um balanço hídrico para cada célula (Figura 3.3 (c)).

No interior de cada cava foi instalado um lisímetro para coletar uma parcela do efluente que percola através do rejeito grosso. Os lisímetros são cilindros de polipropileno com 2 metros de altura e 2 metros de diâmetro, com lateral e fundo impermeável e parte superior aberta, conforme Figura 3.3 (d). A posição do lisímetro dentro da cava foi determinada com modelagem numérica do fluxo de água (SOUZA *et al.*, 2009) utilizando o programa SEEP (GEOSLOPE, 1998). Através desta modelagem verificou-se que os lisímetros instalados nesta posição (no fundo e no centro das cavas), não alteravam o fluxo de água dentro do rejeito (SOUZA *et al.*, 2009, BORGHETTI SOARES *et al.*, 2009).

No fundo de cada cava há uma saída que conduz o efluente do lisímetro para um poço de coleta (drenagem interna) localizado na parte central do aterro, conforme a figura 3.3 (e). O poço (figura 3.3 (f)) possui 4 metros de profundidade em relação à cota superior do aterro, estando 1 metro abaixo da cota de fundo da cava. Existe também outra saída que conduz o efluente do restante de cada cava (parte externa ao lisímetro) para uma rede de saída com objetivo de medir volume.

O escoamento superficial (“run-off”) é medido em reservatórios (caixas d’água de 3000 litros) individuais instalados em cada célula. A água que não se infiltra é conduzida por calhas, construídas ao longo do perímetro das células, até os reservatórios onde são medidos volumes, conforme pode ser visto na figura 3.3 (g).

As medidas diretas de evaporação só serão iniciadas no segundo semestre de 2010, e, portanto, a estação até o presente momento não possui nenhum dado referente a este parâmetro.

### CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

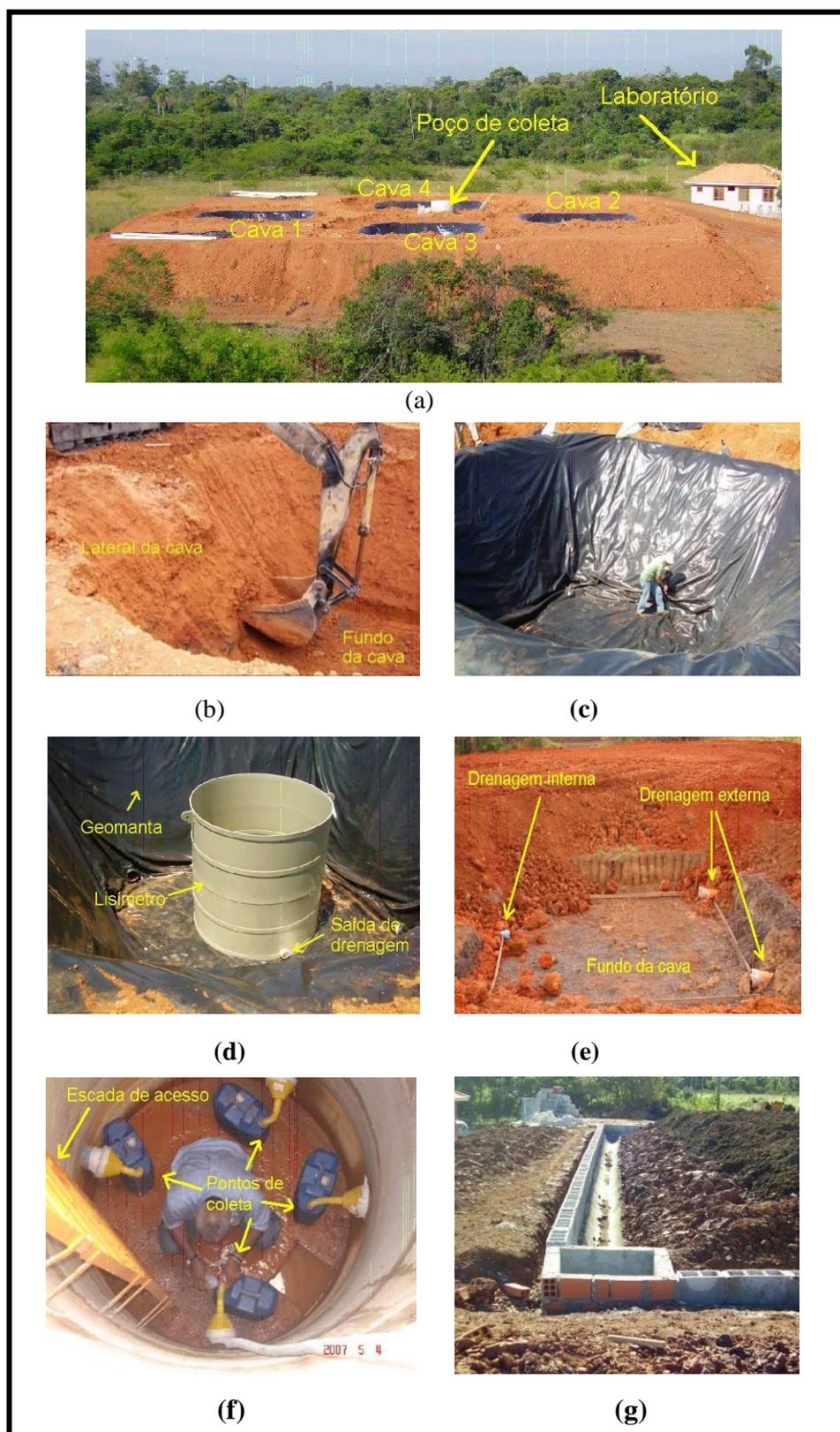


Figura 3.3 – Etapas da construção da Estação Experimental. (a) Visão geral da Estação; (b) Abertura da Cava; (c) Colocação da geomembrana no fundo da cava; (d) Lisímetro; (e); Localização do sistema de drenagem no interior da cava (f) Poço de coleta de drenagem interna e (g) Calhas para coleta de “run-off”.

## CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

As configurações das camadas foram projetadas através de modelagem numérica utilizando o programa SoilCover (SOUZA *et al.*, 2009), utilizando parâmetros físicos dos materiais de cobertura e rejeito obtidos através de ensaio de laboratório (UBALDO, 2005; MENDONÇA, 2007, SOUZA *et al.*, 2009) conforme as tabelas 3.1 e 3.2, e dados climáticos da região obtidos na Estação Climática de Urussanga.

**Tabela 3.1 - Ensaio de caracterização (materiais de cobertura / rejeito)**

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	G <sub>s</sub>	Granulometria (%)				Classificação SUCS
					Pedreg.	Areia	Silte	Argila	
<b>Argila cinza-amarela<sup>2</sup></b>	30,1	11,6	18,5	2,672	-	29	41	30	CL
<b>Solo Orgânico<sup>2</sup></b>	35,0	20,4	14,6	2,654	-	35	27	38	CL
<b>Rejeito Misturado<sup>2</sup></b>	NP	NP	NP	2,338	65	25	7	3	CL
<b>Rejeito Grosso<sup>1</sup></b>	NP	NP	NP	2,646 <sup>3</sup>	75	16	9	0	GW-GC
<b>Cinza grossa<sup>2</sup></b>	NP	NP	NP	2,043 <sup>2</sup>	8	79	13	0	SM

Fonte: BORGHETTI SOARES *et al* (2009). <sup>1</sup> Mendonça (2007), <sup>2</sup> Ubaldo (2005) e <sup>3</sup>

Ensaio realizado na presente pesquisa (Densidade real dos grãos - NBR 6508).

**Tabela 3.2 - Ensaio de permeabilidade**

Amostra	Características do corpo de prova				
	$h_i$ (%)	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_o$	$h_f$ (%)	$k$ (cm/s)
<b>Argila cinza amarela</b>	16,8	16,83	0,557	27,4	3,25x10 <sup>-6</sup>
<b>Solo orgânico</b>	21,1	14,75	0,762	27,4	5,22x10 <sup>-6</sup>
<b>Cinza Grossa</b>	42	9,8	1,06	50,0	2,45x10 <sup>-4</sup>

Fonte: BORGHETTI SOARES *et al* (2009).

## CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para os ensaios de permeabilidade (Tabela 3.2), os corpos de prova de argila e cinza, foram moldados por compactação estática na condição umidade ótima, o solo orgânico foi compactado 2% abaixo da umidade ótima. A tabela 3.3 apresenta os parâmetros de compactação dos materiais de cobertura por energia proctor normal.

**Tabela 3.3 - Parâmetros de compactação dos materiais de cobertura**

<b>Amostra</b>	<b><math>\omega_{\text{ótima}}</math> (%)</b>	<b><math>\gamma_d</math> (máxima) (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Argila cinza-amarela</b>	16,3	1,680
<b>Solo orgânico</b>	23,5	1,545
<b>Cinza grossa</b>	42,0	0,990

Fonte: BORGHETTI SOARES *et al* (2009)

As curvas de retenção da argila e da cinza foram obtidas através de ensaios de extrator de Richards e papel filtro, respectivamente (UBALDO, 2005 e MENDONÇA, 2007), e a curva do solo orgânico foi obtida através de ensaio de campo por extrator de Richard (BORGHETTI SOARES *et al*, 2009). Para o rejeito misturado a curva de retenção de água foi obtida empiricamente por a partir da curva granulométrica, utilizando o método de Kovacs modificado por AUBERTIN *et al*. (2003). A figura 3.4 mostra as curvas de retenção dos materiais de cobertura, tais como a saída do programa VADOSE/W. A curva de retenção de água do rejeito grosso será obtida no presente trabalho e apresentada no capítulo 5.

## CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

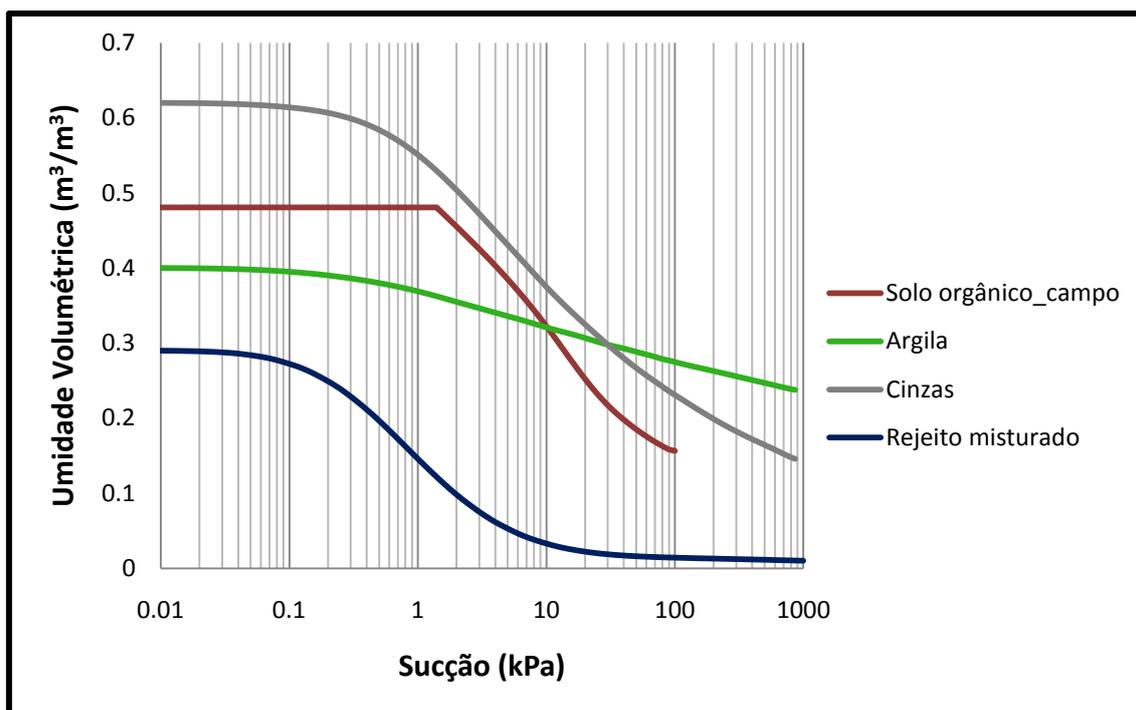


Figura 3.4: Curva de retenção de água dos materiais de cobertura como saída do programa VADOSE/W.

As configurações das células projetadas na Estação experimental são descritas abaixo e podem ser vistas na figura 3.5:

- Célula 1: Possui 3 metros de altura preenchidos com rejeito grosso (material com granulometria de 25 a 37 mm) descoberto. É referencial às demais situações
- Célula 2: Preenchida com rejeito grosso até de 2,7 metros e com uma camada superficial de rejeito misturado (na proporção 2:1)<sup>3</sup> de 30 cm de espessura. Projetada para verificar a eficácia do uso deste tipo de camada de cobertura na minimização da infiltração de água, tal como é utilizado na pilha.
- Célula 3: Preenchida com 2,7 m de rejeito grosso coberto por uma camada de rejeito misturado idêntico a célula 2, mas acrescentou-se 30 cm de espessura de uma camada de argila disponível na empresa (argila cinza-amarela) compactada e seguida de uma camada de 30 cm de

<sup>3</sup> Mistura de duas “quantidades” de rejeito grosso para uma de rejeito fino

## CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

espessura de solo orgânico (superficial e de proteção), não compactado.

- Célula 4: Possui rejeito grosso coberto por uma camada de rejeito misturado idêntico às células anteriores, com uma cobertura de barreira capilar dupla composta de camadas compactadas com 30 cm de espessura cada de cinza grossa<sup>4</sup>, de argila cinza-amarela e cinza grossa, e uma camada superficial de proteção de solo orgânico não compactado.

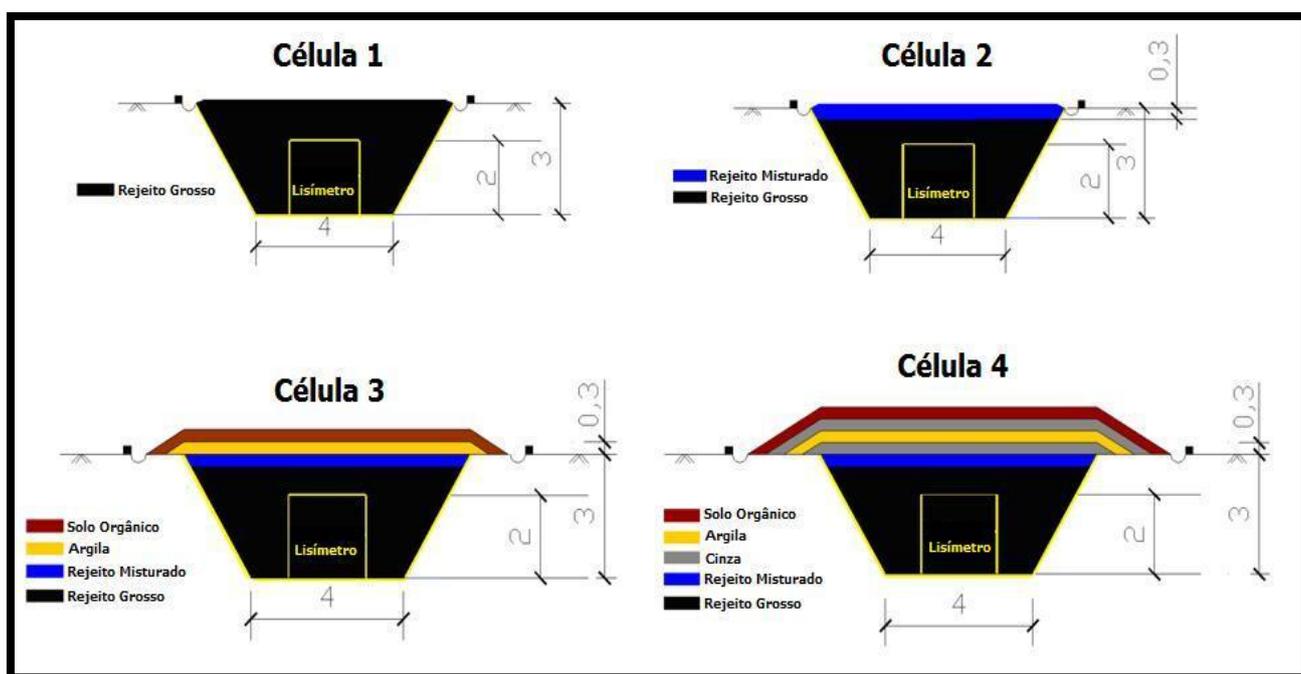


Figura 3.5: Configuração das camadas das células (Modificado de BORGHETTI SOARES *et al*, 2009)

Os materiais que constituem as células possuem os parâmetros de compactação de acordo com os apresentados na tabela 3.3 e foram colocados nas células da seguinte maneira, segundo BORGHETTI SOARES e SOUZA (2007):

- **Rejeito Grosso:** O material foi colocado dentro das cavas por um caminhão basculante e espalhado por uma escavadeira hidráulica. O rejeito foi colocado em uma condição não compactada.

<sup>4</sup> Cinza de fundo da Usina Tractebel (Tubarão – SC) estudada por Mendonça (2007)

## CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

- Rejeito Misturado: O material foi lançado pelo caminhão para o interior da cava (nas células 2, 3 e 4). Foram compactadas duas camadas de 15 cm (espessura total de 30 cm). Após a compactação dos primeiros 15 cm foi instalada uma série de instrumentos (1 medidor de umidade, 1 de sucção e um de temperatura). A compactação foi feita utilizando um equipamento manual (placa vibratória - Modelo *Weber mt*). Não foi possível fazer um controle de compactação visto que não foram feitos ensaios de compactação em laboratório para o rejeito misturado. A densidade da camada foi medida com o uso do frasco de areia.
- Cinza: Este material de cobertura foi compactado com um compactador manual, o mesmo utilizado para o rejeito misturado. Foi feito um controle de compactação (umidade e densidade em campo) e determinado o grau de compactação da cinza. Na célula 4, compactou-se duas camadas de cinza, uma imediatamente abaixo e outra acima da camada argilosa, formando uma configuração de barreira capilar dupla. Em cada camada da cinza foi instalada uma série de instrumentos (no meio da camada).
- Solo Orgânico: Foi depositado em uma camada de 30 cm de espessura, não compactada, sobre a camada de argila na cava 3 e sobre a barreira capilar dupla na cava 4. Na metade da camada foi posicionada a série de instrumentos. A finalidade desta camada é servir como proteção superficial, minimizando a perda de água e a erosão das camadas de argila e cinza.

Para o monitoramento das células, foram instalados os instrumentos em todas as camadas de cobertura e também no rejeito grosso, os quais foram conectados a um sistema de aquisição de dados (*datalogger*) em campo, conforme Figura 3.5. O posicionamento e a quantidade de instrumentos podem ser vistos na Tabela 3.4:

## CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

**Tabela 3.4: Posicionamento e quantidade dos instrumentos**

<b>Célula</b>	<b>Camadas</b>	<b>Série de sensores<sup>5</sup></b>	<b>Pos. horizontal (planta)</b>	<b>Posição vertical (perfil)</b>
<b>C1</b>	R. Grosso	1	Centro da cava	Sobre o lisímetro
<b>C2</b>	R. Grosso	1	Centro da cava	Sobre o lisímetro
	R. Misturado	1	Centro da cava	Meio da camada
<b>C3</b>	R. Grosso	1	Centro da cava	Sobre o lisímetro
	R. Misturado	1	Centro da cava	Meio da camada
	Argila	2	Centro da cava	Meio da camada
	Solo Orgânico	1	Centro da cava	Meio da camada
<b>C4</b>	R. Grosso	1	Centro da cava	Sobre o lisímetro
	R. Misturado	1	Centro da cava	Meio da camada
	Cinza	1	Centro da cava	Meio da camada
	Argila	2	Centro da cava	Meio da camada
	Cinza	1	Centro da cava	Meio da camada
	Solo Orgânico	1	Centro da cava	Meio da camada

Fonte: BORGHETTI SOARES e SOUZA (2007)

Segundo, BORGHETTI SOARES e SOUZA (2007), os instrumentos foram posicionados no centro de cada camada em planta, mostrados na Figura 3.6, exceto no rejeito grosso onde os sensores foram colocados imediatamente acima do topo do lisímetro. Na camada de argila, foram instaladas duas séries (duplicata), por se tratar de um importante ponto a ser analisado e estudado.

---

<sup>5</sup> Uma série de sensores corresponde a: 1 sensor de umidade, 1 sensor de sucção e 1 sensor de temperatura (Borghetti *et al*, 2007)

## CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

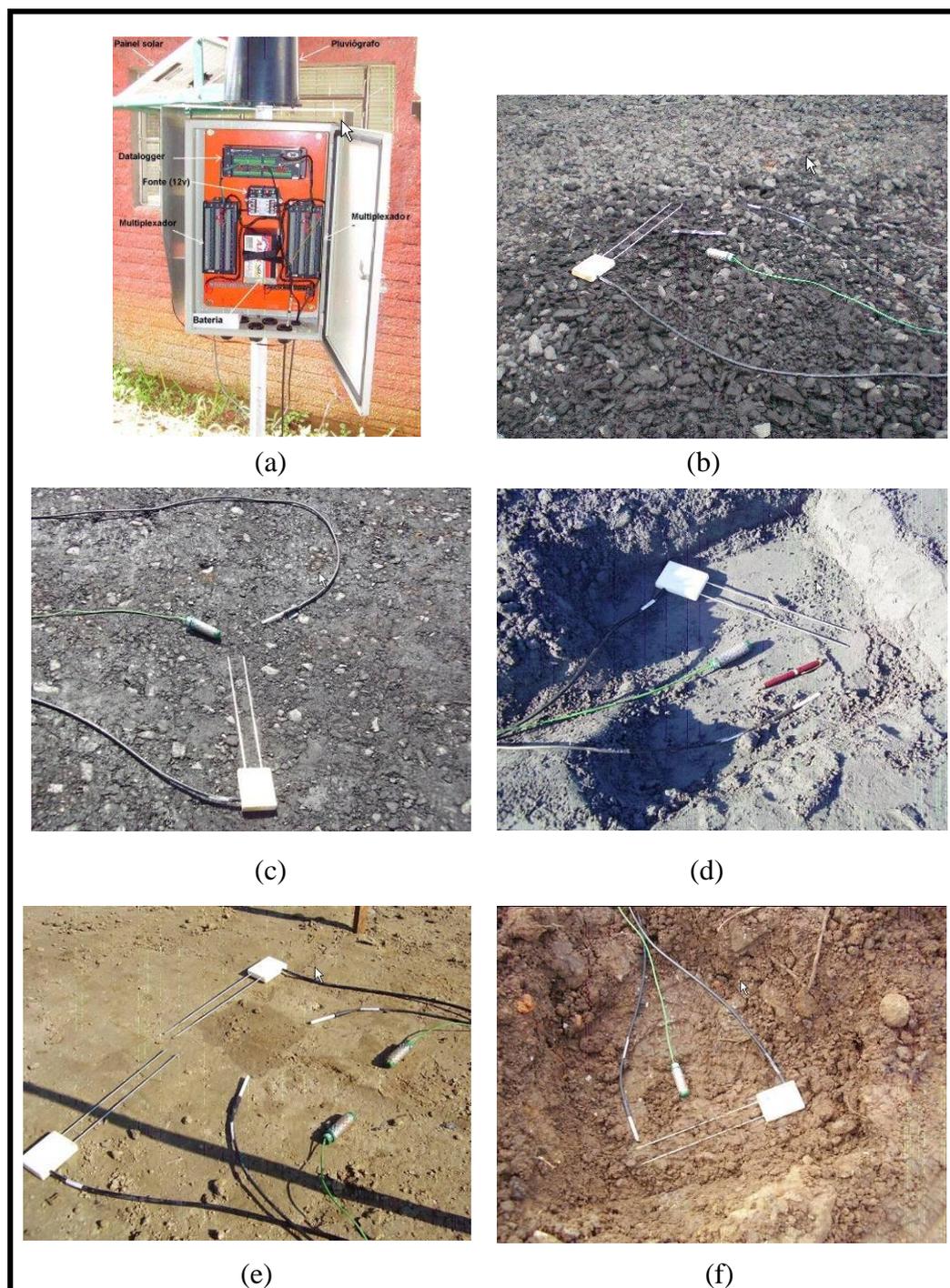


Figura 3.5: Sistema de aquisição e instalação dos instrumentos nas camadas. (a) Sistema de aquisição dos dados; (b) Série de sensores no rejeito grosso; (c) Série de sensores na camada de rejeito misturado; (d) Série de sensores na camada de cinza; (e) Série de sensores na camada de argila; (f) Série de sensores na camada de solo orgânico.

O *datalogger* utilizado é o modelo CR10X (Campbell Scientific/EUA), controlável e programável, protegido por uma caixa acondicionadora, conforme apresentado na Figura 3.6 (a). A alimentação do sistema é suprida por um painel solar e

### CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

a coleta de dados é feita através de um software específico para a comunicação remota e o computador (LOGGERNET) com intervalos de dez minutos.

Os sensores de sucção são fabricados por Campbell Scientific, modelo “watermark 200” 253, é um sensor de matriz granular (GMS) e podem estimar a sucção do solo em intervalos de 0 a 200 kPa. Este sensor utiliza o princípio da condutibilidade elétrica estando atrelada à umidade do solo cujo método de leitura estima o potencial de água dos solos a partir da resistência e temperatura do solo. O modelo utilizado pode ser visto na Figura 3.7.



Figura 3.7: Sensor de sucção (GMS)

Os sensores de temperatura utilizados são do modelo 108 (Campbell Scientific) projetado para medir temperaturas do ar, água e solo. Segundo os fabricantes, o intervalo de medições é de  $-5$  a  $95^{\circ}\text{C}$ , e possuem boa acurácia com erros inferiores a  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ . O resultado da temperatura é utilizado para as medidas de sucção e umidade do solo. A figura 3.8 apresenta uma imagem do sensor.



Figura 3.8: Sensor de temperatura

## CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os Sensores de umidade (TDR) são fabricados pela Campbell Scientific, Water Content Reflectometers (modelo CS616), usados para medir teores de umidade volumétrica em solos e outros meios porosos. Baseiam-se no princípio da reflectometria, a informação do conteúdo de água é derivada da sensibilidade do sensor para a constante dielétrica do meio onde estão inseridas as hastes do sensor. O instrumento consiste de duas hastes de aço inox conectadas a circuito interno. Uma visão do instrumento pode ser visto na figura 3.9. Possuem acurácia de 2,5% e precisão de 0,1%.

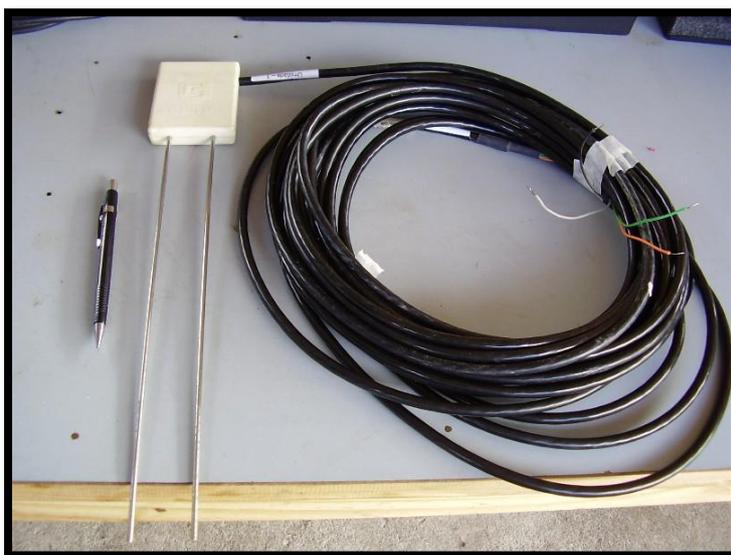


Figura 3.9: Sensor de umidade

As hastes têm 30 cm de comprimento e um diâmetro de 3,2 mm; o corpo central tem dimensões de 85x63x18mm sendo também de fácil instalação. Em campo, instalou-se o medidor na horizontal. As curvas de calibração dos sensores apresentados anteriormente podem ser vistas em anexo.

A estação experimental possui um pluviógrafo ligado ao “*datalogger*”. O sensor pluviométrico utilizado é o RG 7852 (Davis/EUA), baseado no princípio de báscula. O sensor foi programado para que a cada 10 minutos envie dados que serão interpretados e armazenados pelo “*datalogger*”, fornecendo a quantidade de chuva acumulada. Além disso, a unidade experimental ainda possui uma estação meteorológica onde é possível obter dados de volume e intensidade de chuva, velocidade do vento, umidade relativa e temperatura ambiente (BORGHETTI SOARES e SOUZA, 2007)

Um laboratório de apoio técnico também foi construído na estação ao lado do aterro que serve de escritório para a equipe e possui infraestrutura para análises

## CAPÍTULO 3: DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

imediatas dos parâmetros físico-químicos dos efluentes dos lisímetros. O laboratório, bem como a estação experimental concluída, pode ser visto na Figura 3.10.



Figura 3.10: Estação Experimental concluída (Fonte: BORGHETTI SOARES *et al*, 2009)

## CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os dados utilizados da estação experimental, o ensaio de laboratório realizado e a metodologia da simulação numérica. Para determinar a curva característica do rejeito grosso, foi utilizado um equipamento denominado Placa de sucção cujo princípio de funcionamento, metodologia do ensaio e os cuidados necessários estão apresentados no presente capítulo.

### **4.1 – Dados da Estação Experimental**

Em funcionamento desde Outubro de 2007, a estação possui um sistema de aquisição de dados automáticos que coleta dados de umidade, temperatura e sucção em intervalos regulares (10 minutos), além de dados climáticos obtidos na estação meteorológica. Ressalta-se que os dados geoquímicos da estação experimental não foram utilizados na presente pesquisa, pois estão fora do escopo do trabalho.

Para avaliar o desempenho da barreira capilar dupla, o presente estudo selecionou os dados experimentais (sucção, umidade) do ano de 2008, procurando correlacionar com as precipitações ocorridas ao longo deste ano. Tal ano foi escolhido por apresentar os dados anuais completos antes do início da pesquisa.

No ano de 2008 foram selecionados dois períodos distintos: um período seco e um período úmido. O período seco compreende dois meses seguidos com menor índice pluviométrico, que no ano de 2008 corresponde aos meses de julho e agosto. Já o período úmido compreende os dois meses seguidos com maior precipitação que correspondem aos meses de outubro e novembro.

As análises foram feitas na célula 1 (rejeito sem cobertura) e na célula 4 (rejeito com cobertura de barreira capilar dupla). Os resultados da célula 1 servem como referência para a célula 4, considerando o rejeito grosso exposto ao meio ambiente sem nenhum tipo de cobertura. A figura 4.1 apresenta as células selecionadas e as suas dimensões.

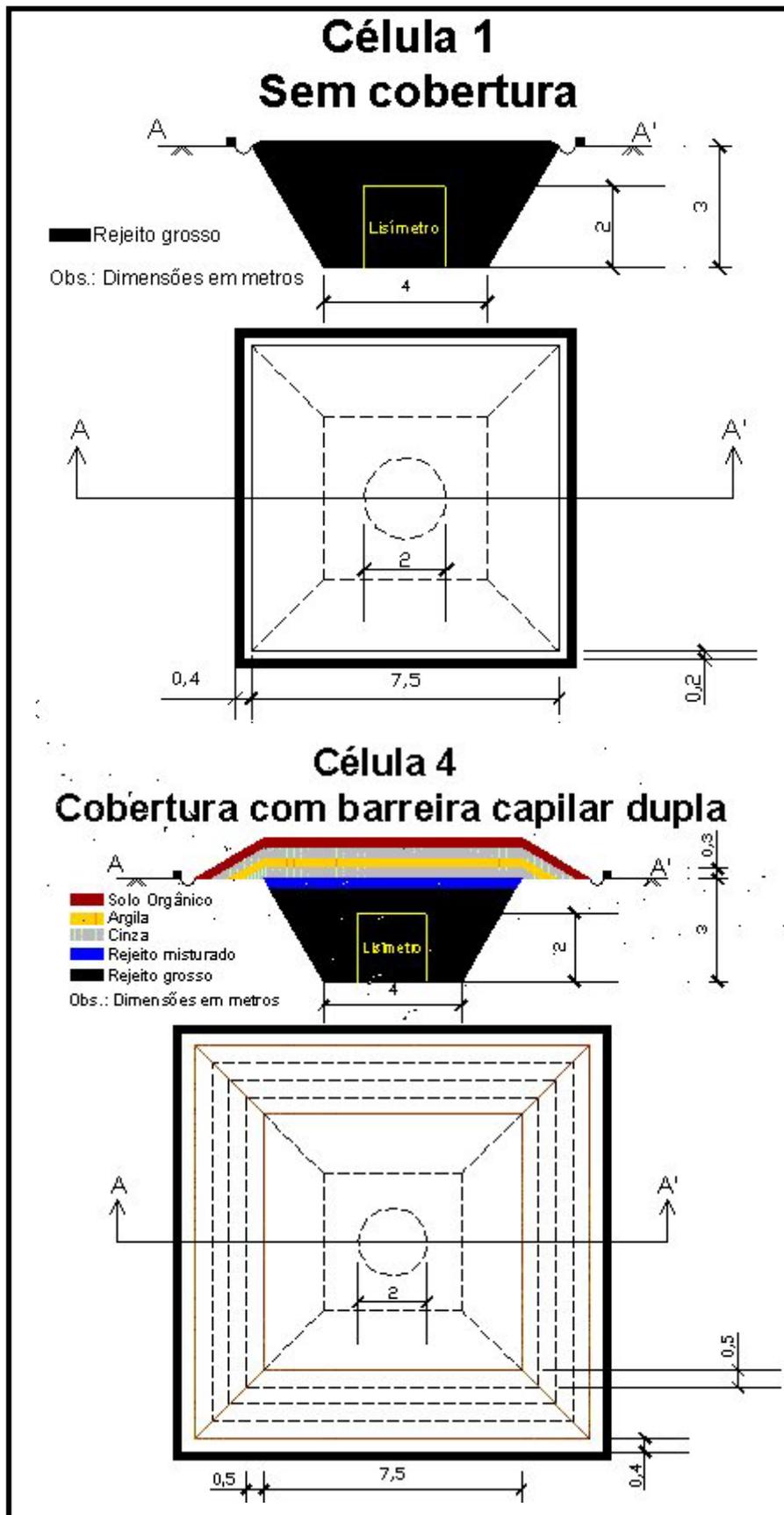


Figura 4.1: Configuração da célula 1 e célula 2 (Fonte: BORGHETTI SOARES e SOUZA, 2007)

### 4.2 - Material utilizado nos ensaios: rejeito grosso

O rejeito grosso proveniente do beneficiamento do carvão (figura 4.2 (a)) foi coletado da pilha de rejeitos (figura 4.2 (b)) da empresa Carbonífera Criciúma S.A. no dia 26/02/2008 e acondicionado em uma bombona sem água, como apresenta a figura 4.2 (c). Devido à forma de armazenamento, o rejeito em contato com o ar sofreu oxidação, inviabilizando análises químicas do material. Neste trabalho não foi considerada a possível influencia da oxidação sobre a curva de retenção devido à sucção osmótica.



Figura 4.2: Material utilizado no ensaio. (a) rejeito grosso; (b) pilha de deposição dos rejeitos; (c) acondicionamento da amostra em bombona sem água.

## CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS

Segundo MENDONÇA (2007), com base em ensaio de balanço ácido-base, o rejeito grosso gerado na empresa Carbonífera Criciúma S.A. apresenta elevado potencial de geração de acidez e baixo potencial de neutralização (poucas substâncias neutralizadoras). A autora realizou ensaios de infiltração no depósito de rejeitos e mensurou valores da ordem de  $4 \times 10^{-1}$  cm/s com massa específica aparente seca de  $1,44$  g/cm<sup>3</sup>.

Em função do processo de beneficiamento, os rejeitos gerados apresentam uma variabilidade quanto à distribuição granulométrica, sendo a maioria dos materiais não plásticos. O rejeito grosso pode ser enquadrado como um pedregulho bem graduado com finos, e ácidos com condutividade elétrica elevada, quando comparado com os rejeitos finos. O teor de matéria orgânica é alto, em torno de 30% e o teor de enxofre total é de 7%.

De acordo com MENDONÇA (2007), o rejeito grosso pode ser classificado como Resíduo Classe II-A – Não Inerte de acordo com os resultados obtidos e segundo a definição apresentada na norma NBR 10004/2004.

No ensaio de solubilização, segundo a autora supracitada, o rejeito grosso apresentou manganês, cobre alumínio e dureza acima do que a norma preconiza e no ensaio de lixiviação não excedeu os limites preconizados pela norma.

A taxa de absorção de água (teste de imersão em água por 24 horas) do rejeito é de 1,82 % em média.

### 4.3 – Ensaio da Placa de sucção

Um dos aspectos de grande importância para a caracterização dos materiais e, no caso do presente estudo, do rejeito grosso, é a capacidade de retenção de água. Na literatura, encontram-se amplamente discutidos métodos e resultados relacionados à obtenção da relação entre a quantidade de água (teor de umidade) e a sucção para areias, siltes, argilas e materiais finos (FREDLUND e XING (1994), VANAPALLI *et al.* (1999), TEIXEIRA (2002), MIGUEL *et al.* (2006), FEUERHARMEL (2007), entre outros). No entanto, há poucas referências quanto à curva de retenção de materiais mais grosseiros como rejeito grosso.

A determinação da curva de retenção de água é fundamental para análise do fluxo de água de um solo não saturado, fornecendo informações geotécnicas

## CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS

importantes relacionadas à infiltração da água, variação volumétrica e resistência ao cisalhamento. Na presente dissertação, o método utilizado para a obtenção da curva de retenção de água do rejeito grosso foi o método da placa de sucção com capacidade de fornecer pontos experimentais da curva de retenção de água para valores de sucção entre 0 e 25 kPa.

O método da placa de sucção caracteriza-se pela medição da sucção mátrica da amostra onde se aplica diretamente uma poropressão de água negativa mantendo a poropressão de ar na condição atmosférica. A sucção imposta é dada pela diferença entre a pressão atmosférica e a pressão na água ( $u_a - u_w$ ).

O ensaio de sucção realizado é uma adaptação do sistema desenvolvido pelo laboratório de Mecânica dos Solos da Escola Politécnica da USP (TEIXEIRA, 2002). O equipamento do ensaio consiste em uma base de acrílico de formato circular contendo em seu interior uma pedra porosa de alta entrada de ar (100 kPa), como pode ser visto na figura 4.3.



Figura 4.3: Base da placa de sucção

A pedra porosa fabricada pela Soil Moisture Equipment Corporation possui as seguintes características: 15 cm de diâmetro, espessura de 0,7 cm, porosidade de 34 %, máximo diâmetro de poro de 2,1  $\mu\text{m}$  e permeabilidade saturada de  $3,46 \times 10^{-7}$  cm/s.

A base de acrílico possui uma saída onde é conectada uma mangueira de 1,4 polegadas de diâmetro e possui um furo central de 0,4 cm. O esquema da placa de sucção utilizada no presente trabalho está apresentado na Figura 4.4.

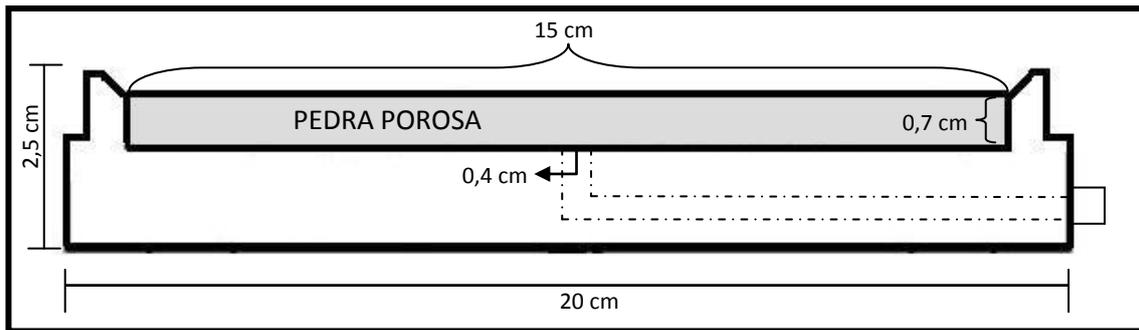


Figura 4.4: Esquema da base da placa de sucção.

### 4.3.1 – Metodologia do ensaio

O princípio deste sistema é baseado na teoria dos vasos comunicantes onde em cada extremidade do sistema atua a pressão atmosférica. Com isso, a sucção aplicada pela pedra porosa está relacionada à diferença de sua altura em relação ao reservatório de água colocado na outra extremidade da mangueira. O fluxo de uma extremidade a outra ocorre até que haja um equilíbrio hidráulico.

O valor da sucção de entrada de ar da pedra porosa (100 kPa) impede que a água presente em seu interior e na mangueira escoe completamente para o reservatório de água. Assim, a água da pedra porosa passa a ficar com uma pressão negativa correspondente à diferença de altura em relação ao reservatório. Desta forma, um desnível de um metro corresponde a uma sucção igual a 10 kPa, medida em relação à pedra porosa (base do corpo de prova).

A placa de sucção é apoiada sobre um suporte metálico preso a uma haste de 3 metros de altura. Esta haste possui um sistema de roldanas que permite qualquer variação de altura, conforme pode ser visto na figura 4.5.

## CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS



Figura 4.5: Haste metálica com o sistema de roldanas

Uma balança semi-analítica com sensibilidade de centésimos foi utilizada para se obter o ponto de equilíbrio de cada estágio. Ela foi colocada sob a placa de sucção, como pode ser observado na figura 4.6



Figura 4.6: Balança semi-analítica utilizada no ensaio da placa de sucção.

## CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS

O reservatório de água possui uma abertura para atmosfera e é fixado de forma permanente a outra haste na mesma altura da placa de sucção no primeiro estágio do ensaio sem aplicação de sucção. No decorrer do ensaio, a placa de sucção foi colocada em diferentes alturas: 0,5m; 1m; 1,5m; 2m e 2,5m. A figura 4.7 apresenta os acessórios necessários para o ensaio.



Figura 4.7: Acessórios necessários para o ensaio. 1) Reservatório de água; 2) mangueira e 3) Conjunto Placa de sucção + balança semi-analítica.

Para saturação da pedra porosa, a base da placa de sucção foi colocada em um recipiente com duas entradas, uma para aplicação de vácuo e outra para a entrada de água, conforme a figura 4.8.

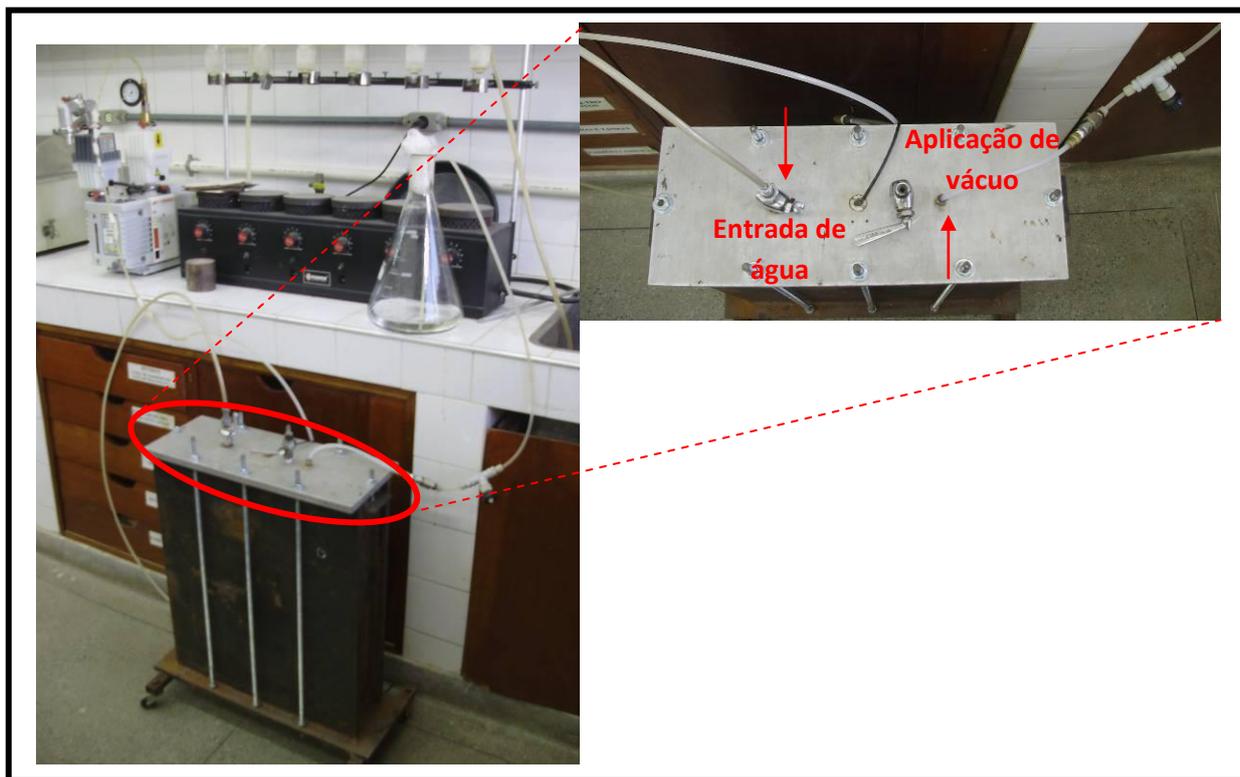


Figura 4.8: Sistema utilizado para saturação da placa de sucção com detalhe para as entradas da câmara utilizada.

Primeiramente, aplicou-se vácuo na câmara durante 24 horas, após este período colocou-se, concomitantemente à aplicação de vácuo, de 8 a 6 litros de água destilada deaerada<sup>6</sup> e esperou-se mais 3 horas. O reservatório de água e a mangueira foram preenchidos com água destilada deaerada e conectados ao conjunto da placa após a saturação.

A princípio, foi feito um ensaio sem o corpo de prova para calibração do sistema e verificação do funcionamento do ensaio. Foram feitos todos os procedimentos: saturação da pedra porosa, preenchimento do reservatório e mangueira e todos os estágios do ensaio (inicial – sem diferença de altura entre o reservatório e a placa até o ponto com 2,5 metros de diferença de altura).

Durante o ensaio de calibração foi observado que a mangueira utilizada no sistema (figura 4.7 (2)) exercia uma influência sobre a variação do peso medido na balança. Para mensurar este sobrepeso, considerou-se que a variação do peso obtido para cada altura era o erro associado ao peso da mangueira, uma vez que o sistema

<sup>6</sup> Água deaerada no vácuo até não se observar a presença de bolhas de ar.

## CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS

permanece saturado ao longo de todo o ensaio. O anexo I apresenta o ensaio de calibração e o cálculo do erro associado à mangueira.

Após esta etapa, foram realizados 3 ensaios com o rejeito grosso. Para moldar o corpo de prova foi utilizado um anel de PVC com diâmetro interno igual ao diâmetro da pedra porosa (15 cm de diâmetro) e com 3 cm de altura colado à placa de sucção com silicone, conforme a figura 4.9.

O rejeito grosso foi quarteado e colocado na placa até preencher todo volume do anel, devido às suas características, o material foi arranjado manualmente dentro do anel de modo a alcançar densidade semelhante à condição de campo. Na tabela 4.1 são mostradas as densidades do rejeito grosso nos três ensaios e em campo.

**Tabela 4.1: Densidades do rejeito grosso**

$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	
<b>Em campo</b> <sup>1</sup>	1,35
<b>Ensaio 1</b>	1,31
<b>Ensaio 2</b>	1,24
<b>Ensaio 3</b>	1,25

<sup>1</sup>MENDONÇA (2007)

Em seguida, o corpo de prova foi saturado de forma ascendente, onde o fluxo se estabelecia no sentido do reservatório de água para a pedra porosa e conseqüentemente para o rejeito grosso. Para este procedimento, o reservatório de água foi colocado em uma altura superior à placa de sucção.

Para se definir a saturação do corpo de prova, compreendeu-se como saturado a partir do momento que o rejeito se encontrava submerso, conforme visto na figura 4.9.

## CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS

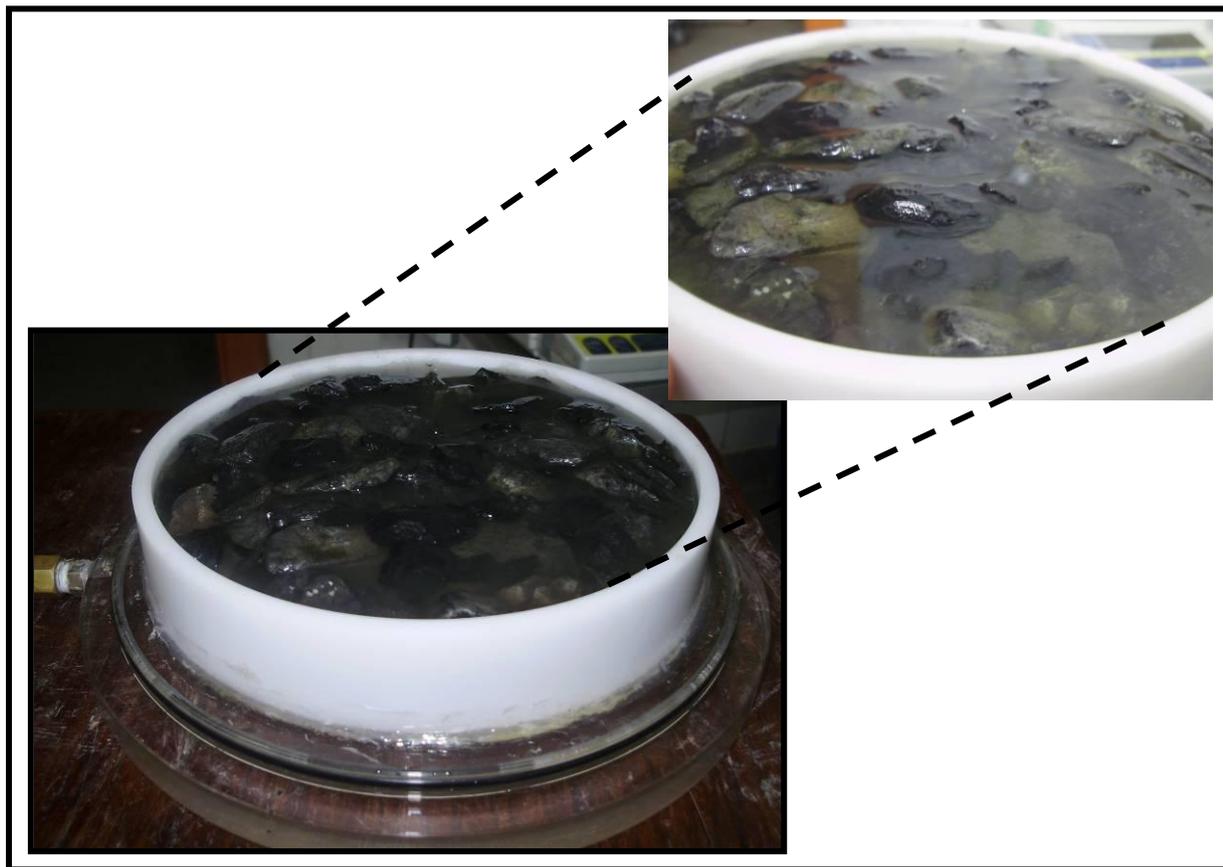


Figura 4.9: Corpo de prova moldado com ajuda de um anel de PVC, em detalhe o corpo de prova quase saturado

Depois da saturação do corpo de prova, o reservatório de água e a placa de sucção foram colocados no mesmo nível a fim de se alcançar o equilíbrio. Este equilíbrio foi estabelecido através da balança embaixo da placa de sucção que informava o peso do conjunto (base da placa de sucção + anel + tampo + corpo de prova).

Se o peso do conjunto se mantivesse constante, este era o ponto de equilíbrio hidráulico. A partir do equilíbrio, aumentou-se 0.5 m de altura da placa de sucção. A cada estágio / altura esperou-se o equilíbrio que levava aproximadamente 24 horas para ser atingido. Desta forma, todo o ensaio (ponto inicial e as cinco alturas) durou cerca de uma semana.

Após a realização do primeiro ensaio verificou-se a precipitação do ferro, oriundo da oxidação do material piritoso que constitui o rejeito grosso, como pode ser observado na figura 4.10.



Figura 4.10: Precipitação de ferro oriundo do rejeito grosso

Deste modo, para a limpeza da pedra porosa os seguintes procedimentos eram realizados:

1. No final do ensaio, ainda com a mangueira conectada à placa<sup>7</sup>, retirava-se o corpo de prova e com a ajuda de água destilada e uma escovinha era retirado o restante do rejeito grosso da pedra porosa.
2. Após essa limpeza superficial, era colocado ácido oxálico 10% na superfície da pedra porosa e esperava-se o tempo necessário para que não se observasse mais a presença de manchas, conforme a figura 4.11.

---

<sup>7</sup> Verificou-se que o procedimento de limpeza da pedra porosa deveria ser com a pedra ainda saturada, sem bolhas de ar, para que o fluxo do líquido fosse facilitado e ocorresse de forma mais rápida.

## CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS



Figura 4.11: Pedra porosa com ácido oxálico 10% após alguns minutos

3. Depois desta verificação, deixava-se que o ácido fluísse através da pedra porosa para o reservatório de água, fazendo com que o ácido limpasse a parte inferior da mesma.
4. A partir do momento que não se verificava mais manchas na parte inferior da pedra, era adicionado água destilada para retirar o restante do ácido oxálico. A fim de acelerar o processo de limpeza do ácido, desconectava-se a mangueira do reservatório de água da placa de sucção e conectava-se outra mangueira para aplicação de vácuo.
5. Esta outra mangueira era conectada em sua outra extremidade, a um kitassato de 125 ml, conforme apresentado na figura 4.12.
6. Colocava-se cerca de 500 ml de água destilada na pedra porosa e verificava-se na água que saía no kitassato a presença do ácido oxálico, como visto na figura 4.12. Esta verificação era feita através de um teste com cloreto de cálcio (CaCl).

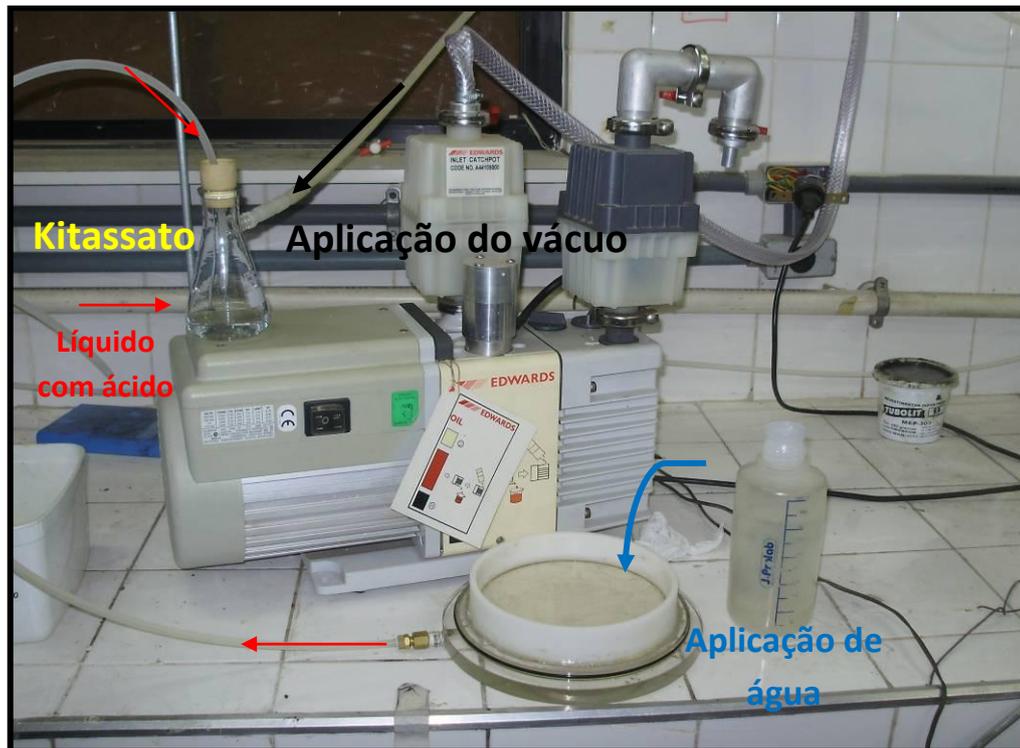


Figura 4.12: Procedimento de limpeza da pedra porosa com a utilização de uma bomba para aplicação de vácuo

### 4.4 – Metodologia para modelagem numérica

Os dados de campo obtêm pontos de medições dadas pelos sensores em cada camada, no entanto, quando há qualquer problema com um sensor ou com o sistema de aquisição, o dado se perde. A modelagem numérica permite extrapolar contornos e gráficos por todo o perfil. Para realizar a simulação, foi utilizado o programa Vadose/W (GEO-SLOPE INTERNACIONAL, 2008) que agrega os dados climáticos como condição de contorno superior, permitindo uma melhor análise do desempenho das coberturas.

#### 4.4.1 – Programa VADOSE/W

O VADOSE/W é um programa bi-dimensional em elementos finitos, que simula o fluxo de água em meios porosos não saturados. Com este programa é possível prever

## CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS

o desempenho de um sistema de cobertura de resíduos geradores de acidez, em regiões onde a evapotranspiração tem grande relevância no desempenho da cobertura.

A vantagem de utilizar um modelo numérico é que os resultados são obtidos de forma mais rápida e fornece informações ao longo de todo o perfil, diferente de um modelo físico, que fornece resultados pontuais dados pelos valores lidos pela instrumentação. No entanto, o modelo numérico apresenta limitações visto que os seus resultados são condicionados por parâmetros de entrada e podem não representar as condições reais em campo.

As aplicações típicas do Vadose/W incluem: análise do fluxo-de sistemas do tipo rejeito-coberturas (camada simples ou multicamadas), utilizando as formulações da Lei de Darcy, determinação da infiltração e da evapotranspiração, além de prognosticar se difusão de oxigênio (leis de Richard e Fick), (GEO-SLOPE INTERNACIONAL, 2008).

O VADOSE/W estende os conceitos encontrados em outros programas de modelagem numérica, tal como o programa SOILCOVER (GEOANALYSIS, 2000), utilizando o método de Penman-Wilson (WILSON, 1990, WILSON *et al.*, 1994) para prever a evaporação real através do conhecimento da umidade do solo e da umidade relativa do ar, acoplados ao fluxo de vapor no solo. Neste contexto, o programa prevê o balanço hídrico relacionando os dados acumulados de precipitação, evaporação, escoamento superficial e percolação.

O programa Vadose/W utiliza métodos mais avançados, diversas equações, incluindo transferência de massa e calor. Estas formulações podem ser vistas e com maior detalhe em GEO-SLOPE INTERNACIONAL (2008).

Em suma, de acordo com alguns autores (PIET *et al.*, 2003; OVERTON *et al.*, 2006; MUKUDANE, 2010; ZHAN *et al.*, 2006; entre outros), este software é capaz de prever de forma eficaz a condição de contorno na superfície do sistema de cobertura através do cálculo da evaporação real embutido no programa. O VADOSE / W possui uma capacidade inata para modelagem dos fluxos em meios saturados e não saturados, tornando possível abordar uma variedade de problemas de engenharia e permitindo uma análise mais detalhada.

## CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.4.2 – Modelo utilizado

O Vadose/W simula matematicamente um processo físico real, sendo no caso do presente estudo, utilizado para simular o fluxo de água em diferentes camadas de cobertura / rejeito e o balanço hídrico em um sistema particular a partir de modelos físicos construídos na estação experimental, já mencionados anteriormente.

No presente trabalho realizar-se-ão simulações com o programa Vadose/W para 2 casos distintos, tais como:

- Caso 1 – Rejeito sem cobertura em regime transiente<sup>8</sup>;
- Caso 2 – Rejeito com cobertura tipo barreira capilar dupla em regime transiente.

A figura 4.13 (a) apresenta a geometria do modelo do caso 1 de rejeito sem cobertura, cujas dimensões e material correspondem a célula 1 da estação experimental. O caso 2 (caso com sistema de cobertura tipo barreira capilar dupla) corresponde a célula 4 da estação experimental, e possui as mesmas dimensões e materiais encontrados em campo, conforme a figura 4.13 (b)

---

<sup>8</sup> Regime transiente é aquele que varia ao longo do tempo tendo correlação com a condição climática

## CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS

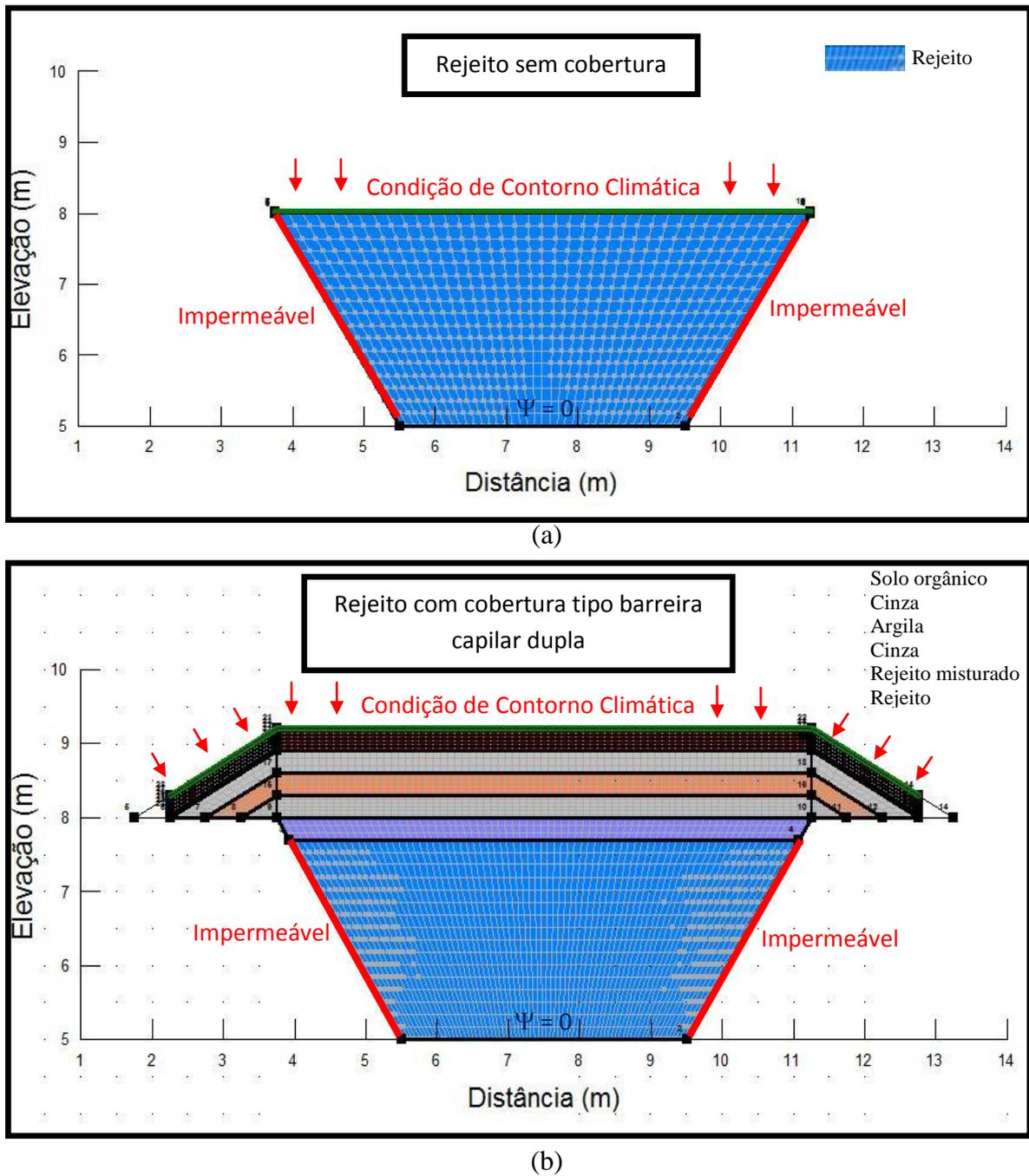


Figura 4.13: Modelos utilizados para simulação numérica com as condições de contorno. (a) Modelo para o caso 1 (rejeito sem cobertura); (b) Modelo para o caso 2 (rejeito com cobertura tipo barreira capilar dupla).

Desta forma os modelos apresentam cavidade em forma de tronco de pirâmide invertido com volume de aproximadamente  $110\text{m}^3$ , apresentando área de base superior de  $57\text{m}^2$ , base inferior de  $16\text{m}^2$  e altura de 3 metros, possuindo as seguintes configurações:

## CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS

- Caso 1: cavidade preenchida com rejeito grosso (3 metros) sem cobertura, e
- Casos 2: cavidade preenchida com rejeito com cobertura tipo barreira capilar dupla constituída por cinco camadas: (i) 2,7 metros com rejeito grosso; (ii) 30 cm de rejeito misturado; (iii) 30 cm de cinza; (iv) 30 cm de argila; (v) 30 cm de cinza e solo orgânico.

Para as análises dos regimes transientes, selecionou-se dois meses de acordo com as precipitações do ano de 2008. Desta forma, adotou-se o mês de julho e o mês de outubro que caracterizam o mês com menor índice pluviométrico e o maior, respectivamente.

Como no caso dos períodos selecionados para as análises dos dados de campo, mencionados anteriormente, esta seleção dos períodos para simulação tem por objetivo comparar o desempenho do sistema de cobertura tipo barreira capilar dupla nas diferentes condições pluviométricas.

Os resultados obtidos pela modelagem numérica serão comparados com os dados experimentais de campo, posteriormente, no capítulo 6.

## CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos em laboratório através do ensaio da Placa de sucção, cuja metodologia foi apresentada no capítulo 4 e em campo na estação experimental. A comparação entre os dados obtidos em campo com a simulação numérica será feita no próximo capítulo.

### 5.1 – Ensaio da Placa de Sucção

Antes da realização dos ensaios, foi feito uma calibração do sistema experimental (Placa de sucção), como mencionado no capítulo 4, onde foram mensurados alguns valores de calibração do sistema, apresentado no Anexo I.

Foram feitos três ensaios com o rejeito grosso com os índices físicos apresentados na tabela 5.1 para a determinação da curva de retenção de água, as quais são apresentadas na figura 5.1.

**Tabela 5.1: Índices físicos iniciais das amostras utilizadas nos ensaios**

Índices	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Massa seca do rejeito (g)	750,03	709,08	710,53
Volume do anel (cm <sup>3</sup> )	570,47	570,47	570,47
Volume do rejeito (cm <sup>3</sup> )	283,46	267,98	268,53
Volume de água (cm <sup>3</sup> )	287,69	302,49	301,94
Massa específica aparente seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,31	1,24	1,25
Gs <sup>1</sup>	2,646	2,646	2,646
e	1,01	1,13	1,12
n	0,5	0,53	0,53
Umidade em campo <sup>2</sup> (%)	3,77	3,77	3,77
θ <sub>sat</sub> (%)	50,25	53,02	52,93
S	100	100	100

<sup>1</sup> Densidade real dos grãos - NBR 6508; <sup>2</sup> MENDONÇA (2007)

Os cálculos para obtenção dos índices físicos utilizados nos ensaios estão apresentados em anexo (ANEXO I).

## CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

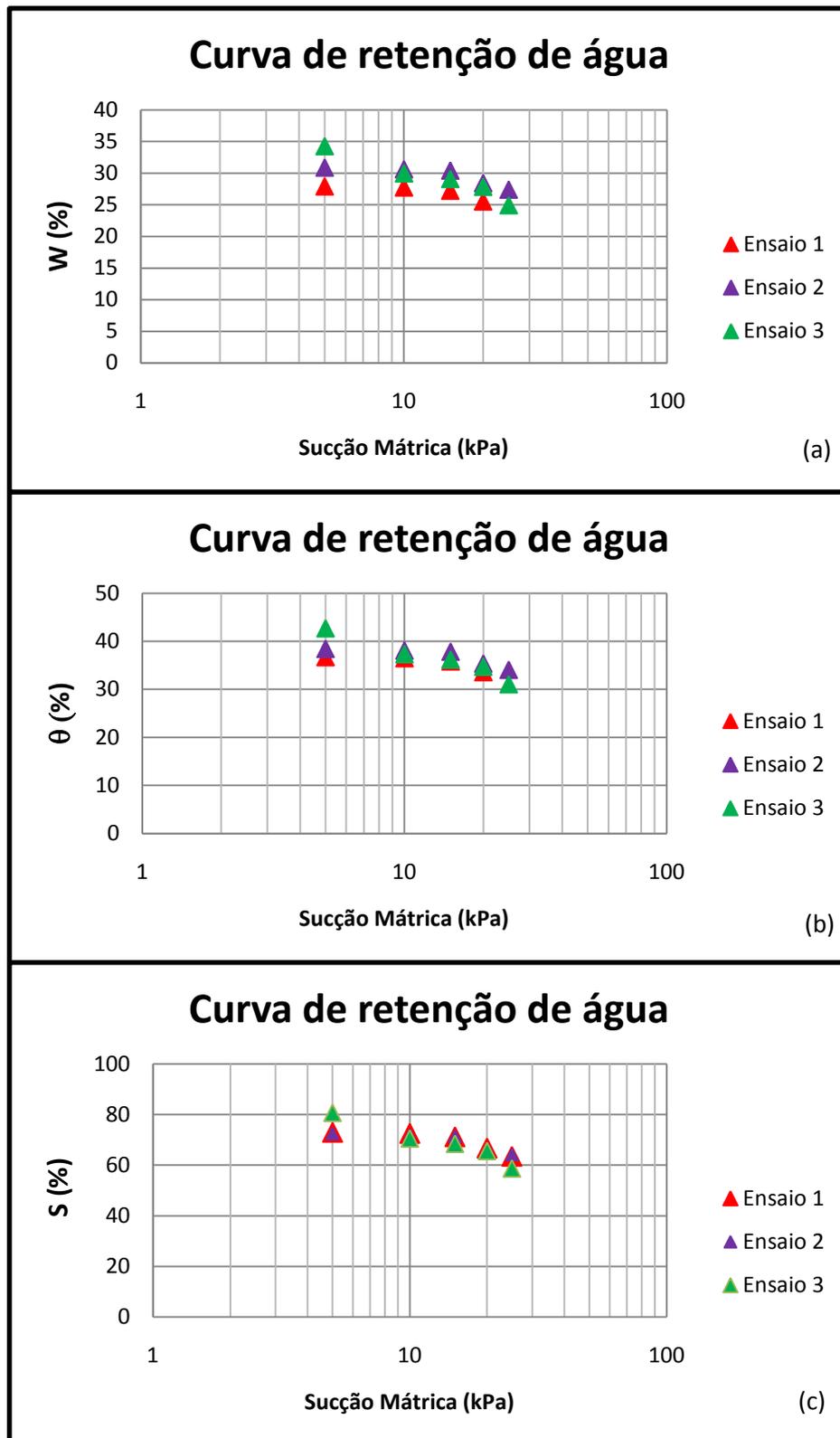


Figura 5.1: Ensaios da Placa de sucção. (a) sucção mátrica x teor de umidade volumétrico; (b) sucção mátrica x teor de umidade gravimétrico e (c) sucção mátrica x grau de saturação.

## CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De acordo com a figura 5.1, os ensaios apresentaram resultados próximos e tiveram um repetibilidade entre si, e desta forma, observa-se que as curvas tendem a se superpor. A diferença ocorrida em alguns pontos reflete a dificuldade encontrada para moldar o corpo de prova, visto que o rejeito grosso possui partículas grosseiras e apresenta um estágio avançado de degradação.

As curvas dos ensaios foram ajustadas com o auxílio do programa RETC, que faz um ajuste numérico para encontrar os parâmetros  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$ , utilizados no método de VAN GENUCHTEN (1980). Os parâmetros estabelecidos são apresentados na tabela 5.2. Considerou-se no ajuste os parâmetros  $m$  e  $n$  independentes.

**Tabela 5.2: Parâmetros estimados graficamente para ajuste de curva de retenção para os ensaios.**

$\theta_s$	$\theta_r$	$\Theta$	$\alpha$	$n$	$m$
0.5290	0.001	0.235	1.0000	1.10	0.13

Os parâmetros ( $\alpha$ ,  $m$  e  $n$ ) propostos pelo referido autor estão relacionados com a forma da curva de retenção. O parâmetro  $\theta_s$  foi encontrado no ensaio 2 e foi utilizado para o ajuste por ser próximo a média dos 3 ensaios realizados. Os pontos experimentais de cada ensaio são apresentados na figura 5.2. O parâmetro  $\theta_r$  foi estipulado como 1% devido à falta de bibliografia referente à curva de retenção de materiais como o rejeito grosso, e também não prejudica o ajuste já que os pontos estão em sucções baixas.

## CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

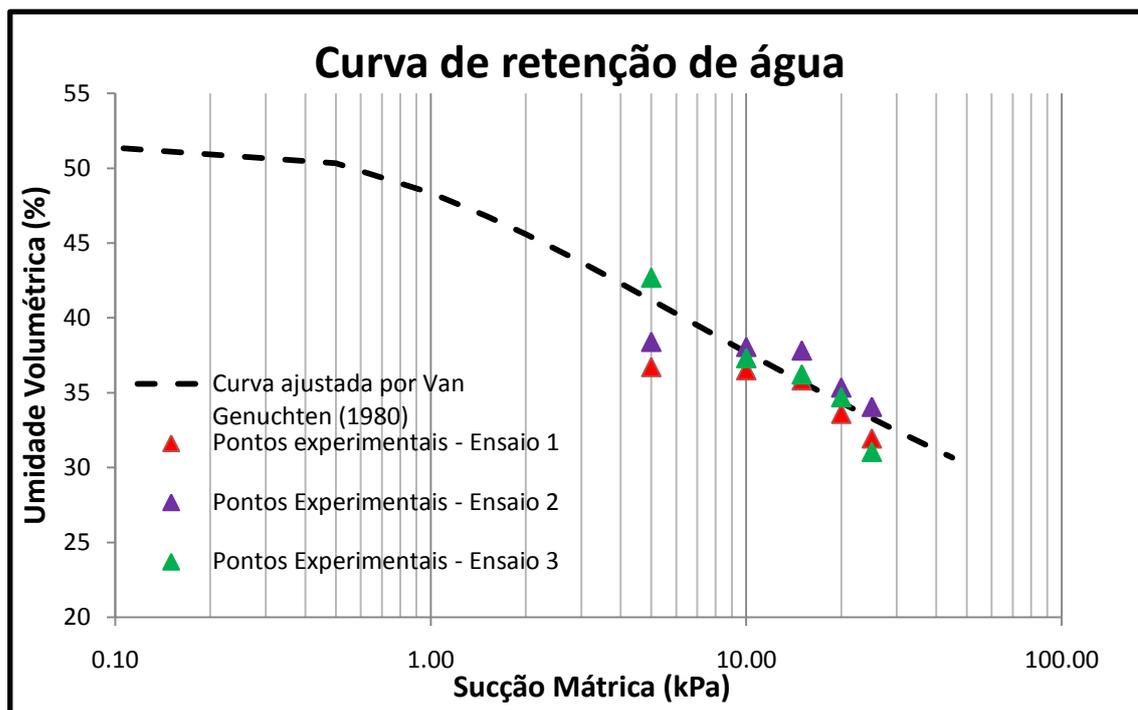


Figura 5.2: Curva de retenção ajustada do rejeito grosso

De acordo com a figura 5.2 é possível perceber que o rejeito grosso com a aplicação de sucção de 25 kPa ainda apresenta a perda de umidade, não alcançando o teor de umidade residual. Este comportamento demonstra uma ação dos microporos que o material aparenta possuir, como pode ser observado na figura 5.3.



Figura 5.3: Foto com zoom macro do rejeito grosso após lavagem e secagem ao ar.

Para verificar a veracidade dessa afirmação são necessários outros tipos de análises com o rejeito grosso, tal como o MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra e assim visualizar a existência dos microporos, e o método B.E.T (Brunauer-Emmett-Teller) que

## CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

é utilizada para a caracterização da porosidade e da superfície específica dos materiais sendo possível obter a área de microporos e do diâmetro médio do poro.

Com a curva de retenção de água é possível obter a variação da condutividade hidráulica não saturada através de solução teórica utilizando a sucção ou teor de umidade, que fornecem bons resultados de acordo com diversos autores que testaram o ajuste destas curvas a pontos experimentais (VAN GENUCHTEN, 1980; LISBOA, 2006).

A utilização deste tipo de método empírico para a obtenção da curva de condutividade hidráulica não saturada se fez necessário porque ensaios de laboratório para determinação direta desse parâmetro são caros, demorados e porque a correlação empírica produz resultados rápidos e com boa concordância com dados experimentais.

A curva de retenção obtida pelo ensaio da Placa de sucção será utilizada através do método de FREDLUND *et al.* (1994) para se obter a curva de condutividade não saturada cujos resultados serão apresentados no próximo capítulo junto com a modelagem numérica.

### 5.2 – Análises dos dados da estação experimental

Ao se analisar o clima da região de Santa Catarina através de dados de precipitação de anos anteriores, é possível perceber que há períodos secos e úmidos ao longo dos meses, indicando que entre os meses de março a agosto ocorre um período mais seco, e entre os meses de setembro a fevereiro ocorre um período mais úmido (CITAÇÃO). No ano de 2008, a precipitação total foi 1418,4 mm, distribuída ao longo dos meses de forma atípica (de Janeiro a Dezembro), conforme a figura 5.4.

## CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

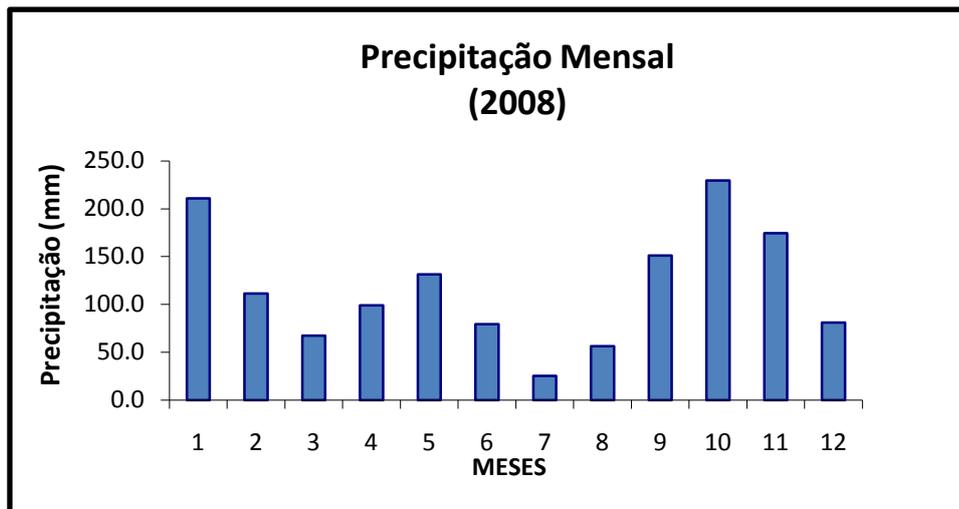


Figura 5.4: Precipitação do ano de 2008 (Fonte: Estação Meteorológica da estação experimental)

A configuração das células é mostrada na figura 5.6.

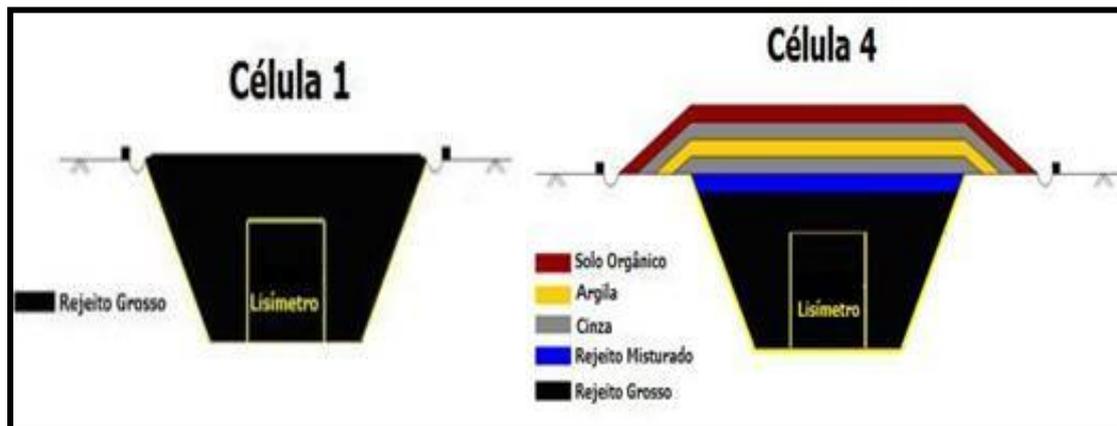


Figura 5.5: Configuração das células 1 e 4 da estação experimental (Modificado de BORGHETTI SOARES *et al.*, 2009)

Os dados de campo analisados da estação experimental serão apresentados por períodos: seco (meses de Julho e Agosto) e úmido (meses de Outubro e Novembro) como exposto no capítulo 4. Além dos dados de sucção e umidade, serão apresentados dados de carga total (obtidos da correlação com a sucção).

# CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

## 5.2.1 – Período Seco

A figura 5.6 mostra os resultados de precipitação, umidade, sucção para a célula 1 do período seco de 2008.

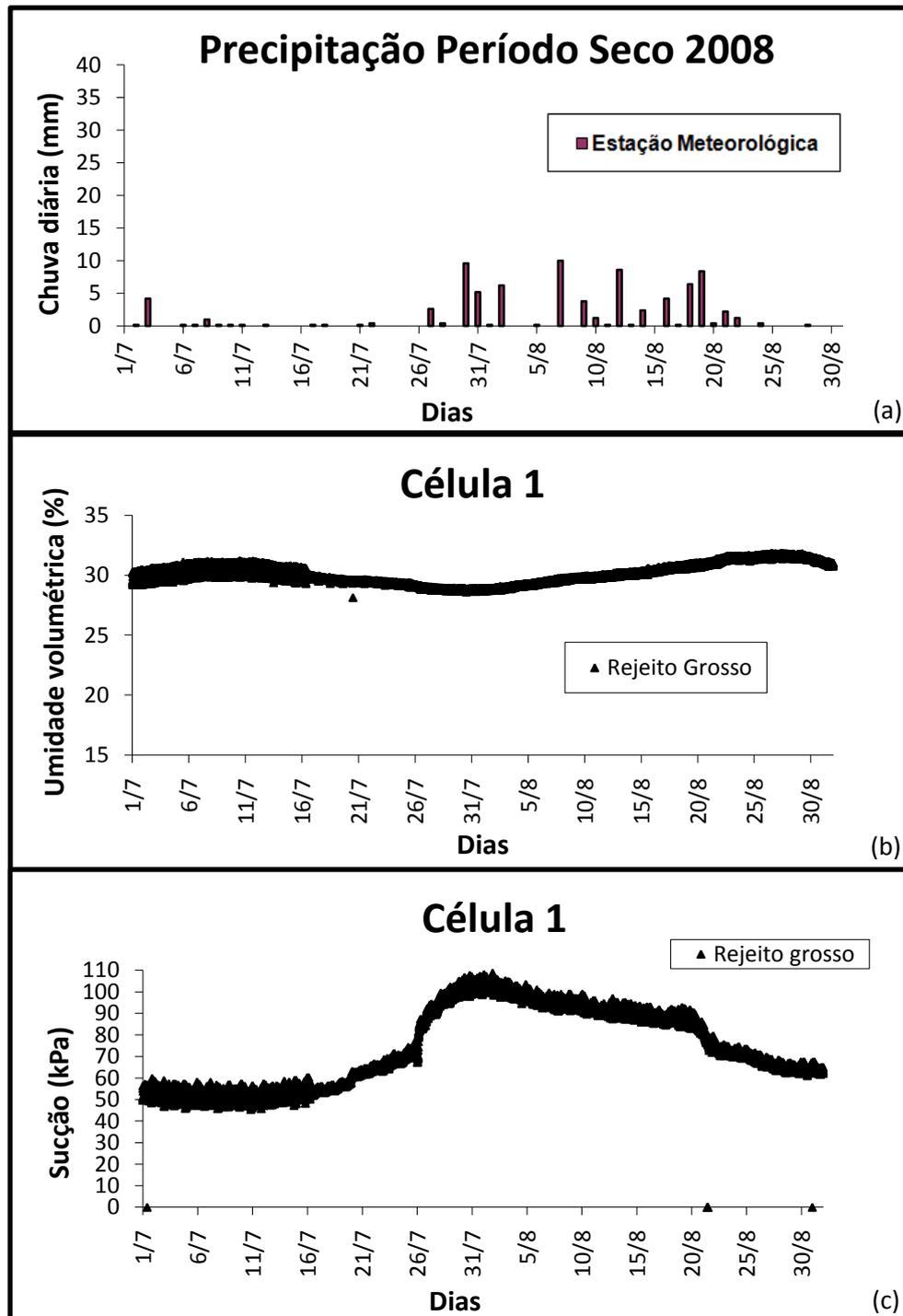


Figura 5.6: Dados da estação do período seco. (a) Precipitação do período; (b) umidade célula 1 e (c) sucção célula 1.

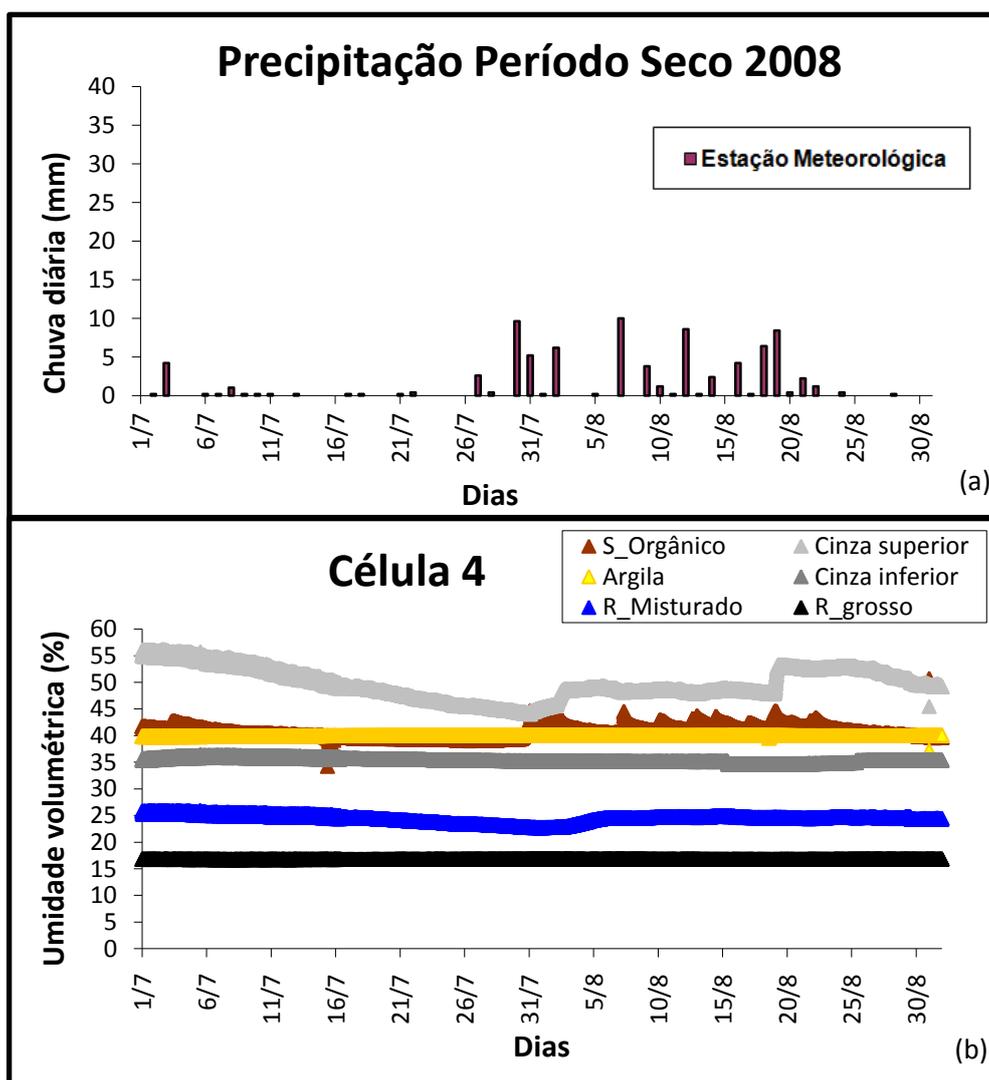
## CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao longo dos 62 dias do período seco a precipitação total foi de 82 mm. Os dias do período que tiveram as maiores precipitações foram 30 e 31 de Julho, com 9,6 e 5,2 mm, respectivamente, e os dias 7 (10 mm), 12 (8,6 mm) e 19 de agosto (8,2 mm).

Nota-se que a umidade volumétrica no rejeito grosso (célula 1) não apresenta variação com as baixas precipitações ocorridas no período, permanecendo constante ao longo dos dias com 30% aproximadamente.

Já as sucções apresentam um pico a partir do dia 27 de Julho devido a pouca precipitação, alcançando valores superiores a 100 kPa. Analisando a curva de retenção de água do rejeito grosso é possível notar que com teor de umidade em cerca de 30%, este material possui sucções de 16 kPa, aproximadamente. Desta forma, as elevadas sucções observadas no rejeito grosso podem indicar um erro de leitura do sensor provavelmente pela matriz granular do rejeito grosso.

Na célula 4, para o mesmo período, meses de Julho e Agosto de 2008 (período seco), os valores de umidade volumétrica e de sucção são apresentados na figura 5.7.



## CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

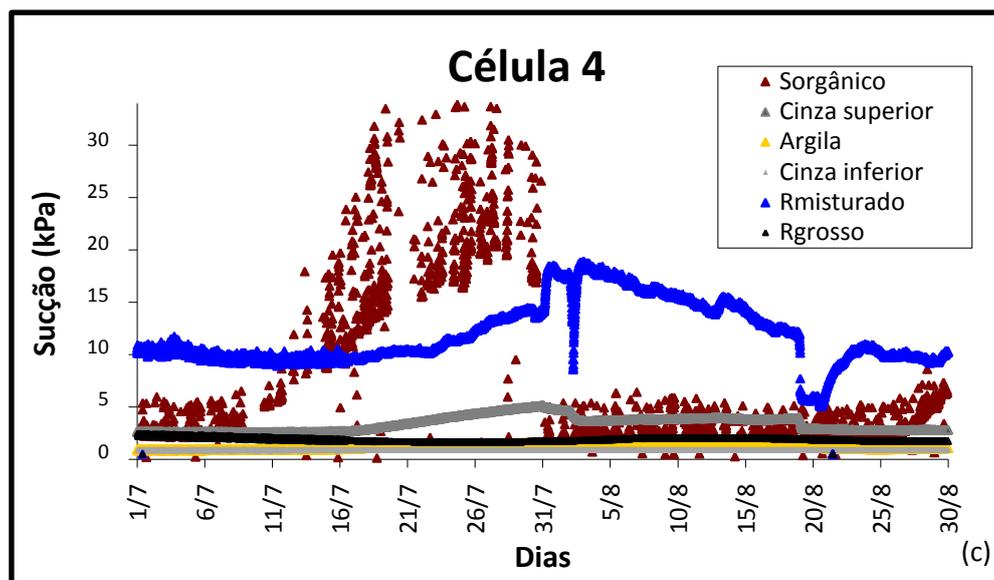


Figura 5.7: Dados da estação do período seco. (a) Precipitação do período; (b) umidade célula 4 e (c) sucção célula 4.

Na célula 4 (Figura 5.7), percebe-se que existe variação no teor de umidade nas camadas mais próximas à superfície. Nota-se que mesmo em condições com baixa precipitação a camada de argila se manteve saturada com cerca de 40% de teor de umidade.

A camada que mais sofreu variações no teor de umidade foi a de cinza superior, onde se percebeu a diminuição da umidade com a falta de precipitação e aumento com as precipitações, ainda que baixas (cerca de 10 mm).

A variação de umidade está diretamente relacionada ao tipo de material de cobertura. Ao se analisar as características da cinza utilizada na barreira capilar no presente trabalho (apresentado no capítulo 3 tabelas 3.1 e 3.2 e na figura 3.4) percebe-se que a cinza possui elevada permeabilidade à água, na condição saturada.

A cinza é um material de granulometria homogênea, promovendo uma estrutura mais porosa se comparada a materiais heterogêneos. Materiais com estas características apresentam, em geral, baixa capacidade de retenção de umidade (BORMA *et al*, 2003), variando assim, com baixas precipitações em períodos secos. Mesmo com pouca chuva, nota-se que esta camada apresentou umidade entre 45 a 50 % (o teor de umidade saturado é cerca de 60%), mostrando a eficiência do sistema de barreira capilar dupla, pois a camada argilosa fica protegida e a perda de água ocorre na camada de cinza superior.

## CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A umidade nas camadas de rejeito grosso e rejeito misturado apresenta pouca variação com as precipitações do período, em torno de 25% para o rejeito grosso e de 15% para o rejeito misturado.

Comparando o rejeito grosso dos dois casos percebe-se que a umidade na célula 4 diminuiu cerca de 15%. Demonstrando de forma clara a eficiência da barreira capilar dupla para minimizar a passagem de água para o rejeito.

Com relação à sucção, é possível notar que a camada de solo orgânico apresenta grande dispersão no período entre os dias 12 a 29 de agosto, mas também se verifica uma correlação com as precipitações. Este período foi marcado pela ausência de chuva ou por sua baixa incidência, onde em cerca de 15 dias choveu um total de 4,2 mm, gerando sucções maiores. Esta dispersão pode significar algum problema no sensor desta camada, visto que o teor de umidade varia pouco neste mesmo período (entre 40 e 35%).

Nas outras camadas de cobertura (exceto a camada de rejeito misturado) e no rejeito grosso, apesar da baixa precipitação, as sucções foram inferiores a 10 kPa. A camada de rejeito misturado, apesar do teor de umidade variar levemente, apresentou sucções variadas relacionada com a precipitação do período.

Analisando os resultados de campo com as curvas de retenção dos materiais utilizados no sistema rejeito/cobertura é possível perceber uma boa leitura nas camadas de solo orgânico, argila e cinza. No entanto, o mesmo não é visto quanto ao rejeito misturado e rejeito grosso, justificando a hipótese de problemas nos sensores de sucção nestas camadas. Esses erros podem ser relacionados à condutividade elétrica (forma de leitura do sensor) que é maior nos rejeitos em função da drenagem ácida (pH baixo, CE elevada, Eh elevado, etc.) (THOMPSON e ARMSTRONG, 1987)

O teor de umidade permite conhecer a quantidade de água que fica armazenada nas camadas no decorrer do tempo, já a sucção refere-se ao estado de energia livre da água no solo. Deste modo, o conhecimento do valor de sucção permite determinar a carga hidráulica total. A diferença de carga hidráulica entre dois pontos indica a direção do fluxo (cujo sentido é da maior para a menor carga hidráulica), como este parâmetro hidráulico é obtido através do valor de sucção, optou-se não apresentar os resultados de carga total na célula 1 devido ao erro encontrado. A figura 5.8 apresenta a carga total para a célula 4 no período seco.

## CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

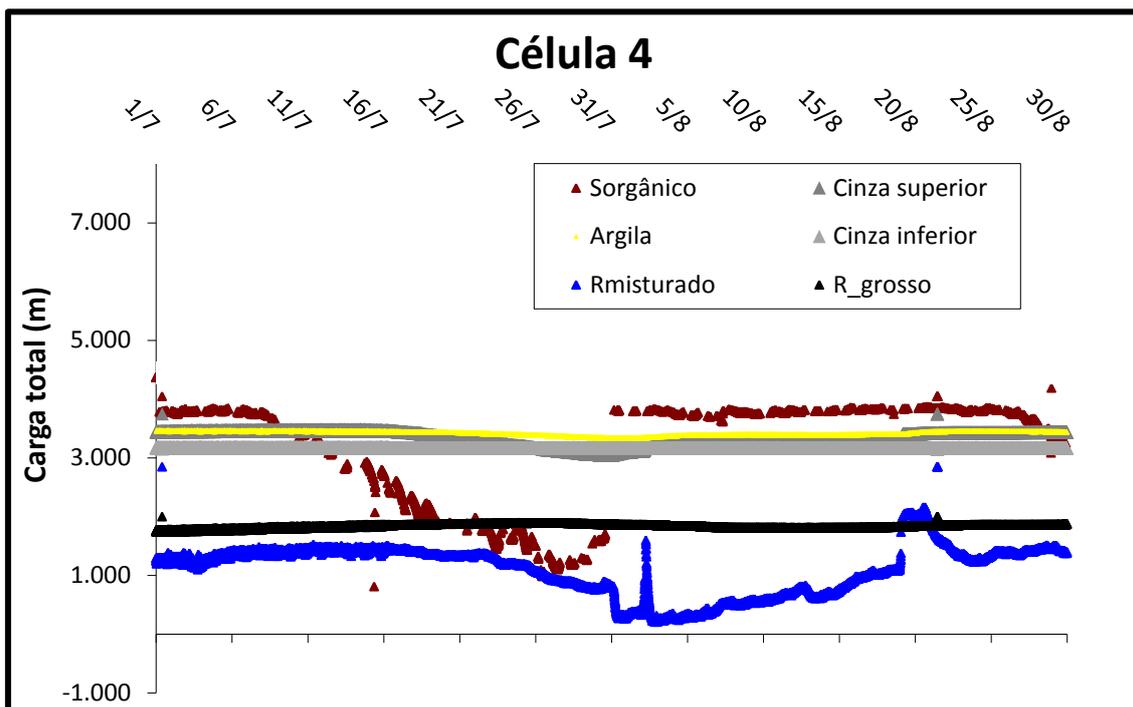


Figura 5.8: Carga total da célula 4 no período seco de 2008. (a) carga total célula 4.

O fluxo de água é gerado devido a diferenças de carga hidráulica que as camadas possuem, relacionado ao grau de saturação, teor de umidade e pelos vazios. De acordo com a figura 5.8, o fluxo para período seco ocorreu da seguinte forma:

- No início do período (dez primeiros dias), o fluxo ocorreu do solo orgânico para as camadas inferiores (abaixo dela); não ocorreu fluxo da camada de argila para a cinza superior;
- Com a não ocorrência de chuva e com a diminuição do teor de umidade devido à evaporação, a camada de solo orgânico apresenta uma perda de carga hidráulica, indicando o fluxo ascendente, ou seja, da camada de cinza superior para o solo orgânico.
- Com a ocorrência de chuva nos dias 30 e 31 de agosto, observa-se fluxo da camada de solo orgânico para a cinza superior (fluxo descendente), visto que o teor de umidade da primeira camada aumenta com a chuva. Nota-se também um fluxo ascendente da camada de argila para a camada de cinza superior relacionado ao teor de umidade da camada argilosa. É necessário ressaltar que as variações são pequenas, pois as precipitações ocorridas são baixas.

## CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

- Em agosto, entre os dias 16 e 22, percebe-se que a carga total da camada de rejeito misturado é maior do que a do rejeito, apresentando pela primeira vez no período seco um fluxo ascendente do rejeito grosso para o misturado.

Em períodos secos, a barreira capilar tende a exibir um melhor desempenho como barreira hidráulica, e não possui um bom desempenho na formação barreira de fluxo de oxigênio. Isto porque em condições secas, com pouca chuva, o grau de saturação da argila tende a ser menor que 85%. No entanto, os resultados de campo apresentados demonstram que o grau de saturação da camada argilosa se manteve a 85% apesar do período seco.

Em regiões com o clima úmido igual à de Santa Catarina, apresentam períodos bem definidos com invernos secos e verão com ocorrência de elevada precipitação. Para que a barreira capilar dupla apresente um bom desempenho nestas condições, é necessário controlar, simultaneamente, a secagem excessiva e a saturação excessiva da camada argilosa.

Para tanto, é primordial analisar também, o desempenho da barreira capilar em condições climáticas com ocorrência de elevada precipitação, conforme será apresentado no próximo subitem.

### 5.2.2 – Período Úmido

Considerando o período úmido de 2008, como os meses de Outubro e Novembro, a precipitação acumulada alcançou valores equivalente a 404,2 mm no total. A precipitação deste período apresenta quatro dias em que o somatório da chuva foi superior a 150 mm, conforme a figura 5.9 e 5.10.

## CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

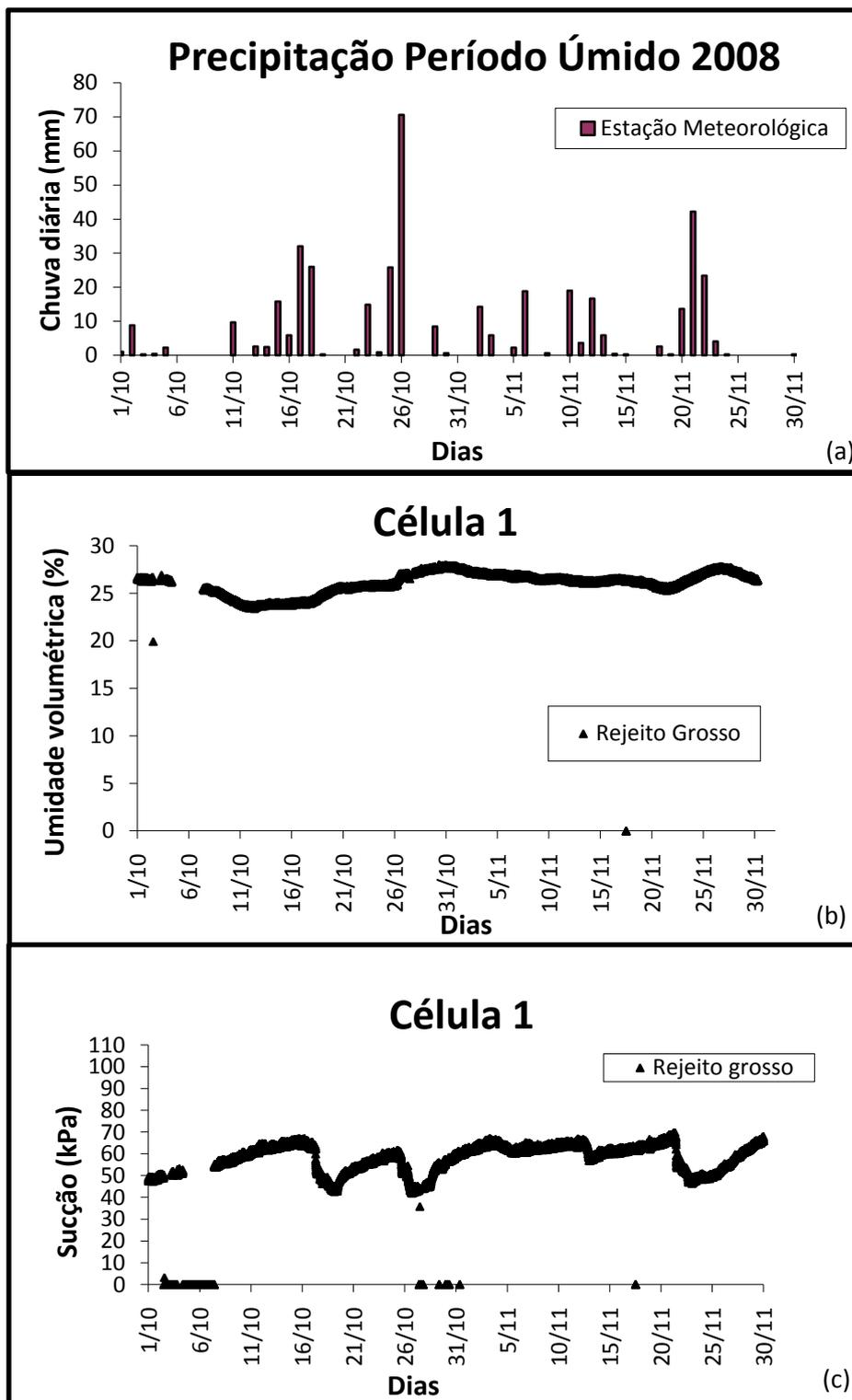


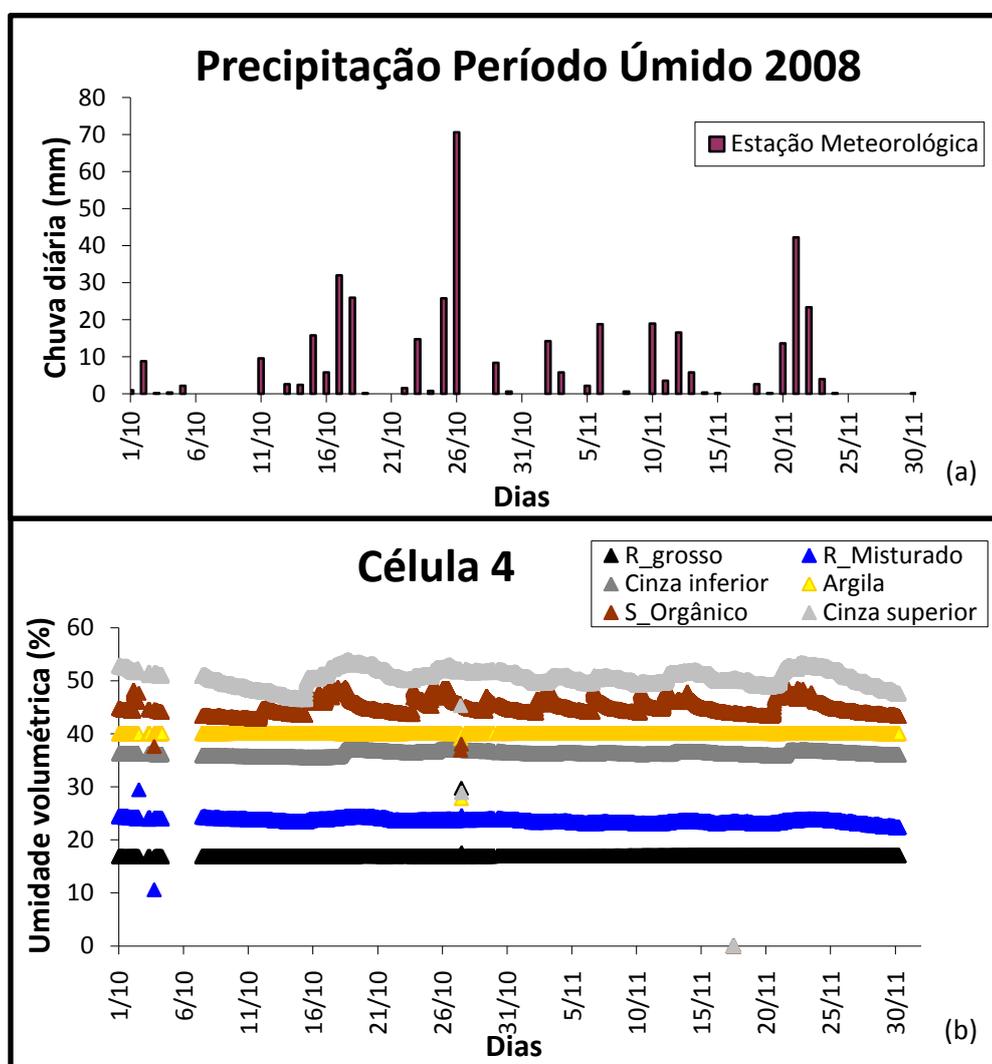
Figura 5.9: Dados da estação do período úmido. (a) Precipitação do período; (b) umidade célula 1 e (c) sucção célula 1.

## CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O presente trabalho não considerou os dados do sensor de umidade para o período úmido na análise do teor de umidade do rejeito grosso, pois considerou-se os dados de umidade inválidos devido à erro do sensor.

De acordo com a curva de retenção de água do rejeito grosso, à umidade de cerca de 25% a sucção referente a esse teor de umidade é de 30 kPa, aproximadamente. Com esta afirmação, é possível perceber que há um erro nos dados apresentados pelo sensor.

A figura 5.10 apresenta os dados obtidos pelos sensores na célula 4, com cobertura tipo barreira capilar dupla.



## CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

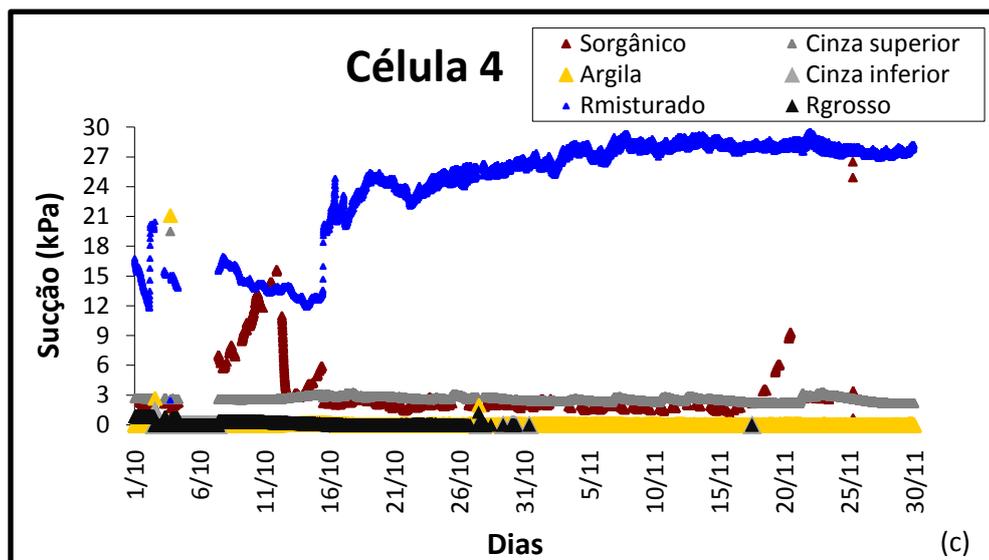


Figura 5.10: Dados da estação do período úmido. (a) Precipitação do período; (b) umidade célula 4; (c) sucção célula 4.

A célula 4 em relação à umidade apresentou um comportamento parecido com o período seco. As variações no teor volumétrico foram observadas nas camadas mais superiores, variando entre 35 e 45% na camada de solo orgânico e entre 45 e 55% na cinza superior. Porém, os valores de umidade nas camadas de cinza e solo orgânico permaneceram mais elevados ao longo do período úmido em comparação ao período seco.

A camada de argila permaneceu saturada, como no período seco, e a camada de cinza inferior apresentou o teor de umidade 35%, com pequenos aumentos na umidade indicando fluxo na camada. A camada de rejeito misturado e rejeito grosso, apesar da quantidade de chuva não apresentaram aumento da umidade em relação ao período seco, constatando a eficiência deste tipo de cobertura na minimização da drenagem ácida.

Quanto à sucção é possível observar que a camada de solo orgânico não apresentou dispersão como no período seco e apresentou baixos valores, exceto entre os dias 6 a 10 de outubro visto que este pequeno período não houve precipitação significativa e por isso a umidade diminuiu e a sucção aumentou.

A camada de rejeito misturado e o rejeito grosso apresentaram valores de umidade coerente, no entanto, os dados de sucção aparentemente não estão funcionando ou estão tendo algum problema.

## CAPÍTULO 5: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos dados de sucção obtidos neste período, é possível mensurar a carga hidráulica total de cada camada e assim caracterizar o fluxo gerado, como representado na figura 5.11. Não serão apresentados os dados de carga total para a célula 1 devido a problemas no sensor de sucção.

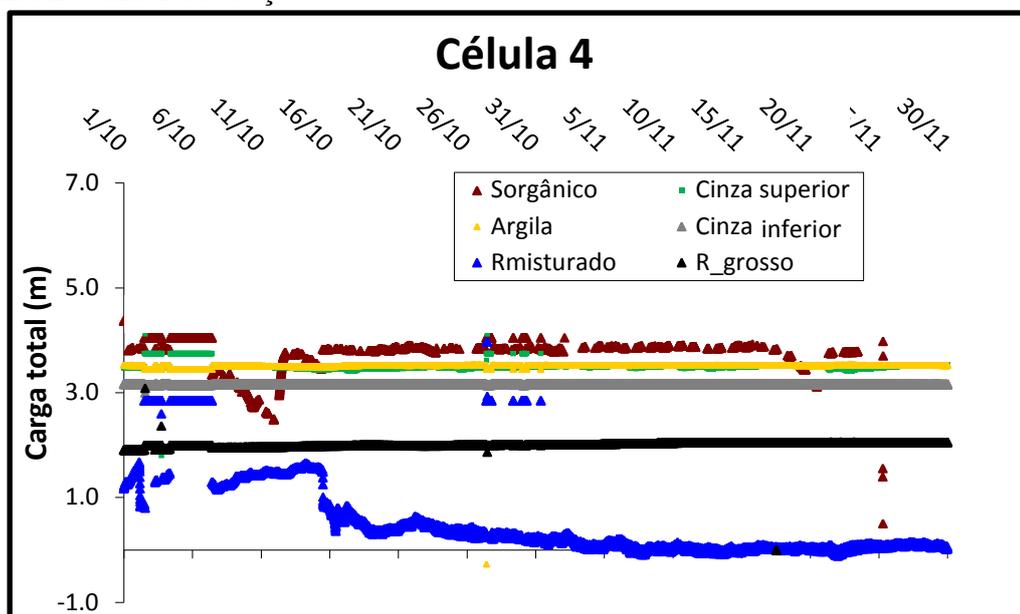


Figura 5.11: Carga total da célula 1 e célula 4 no período úmido de 2008. (a) carga total célula 1 e (b) carga total célula 4.

O fluxo de água para o período úmido apresenta-se de forma semelhante ao período seco, se configurando da seguinte forma:

- Nos primeiros dias do mês de outubro, com a baixa precipitação, percebe-se que a carga total da camada de cinza superior é maior que a carga total da camada de argila. Devido a este fato, o fluxo nesse período ocorreu de forma ascendente, ou seja, em períodos mais secos o fluxo é da cinza superior para o solo orgânico, pois na última camada ocorre de forma mais significativa a evaporação.
- No restante do período é possível notar que o fluxo ocorre em direção ao rejeito, ou seja, descendente. Os dados de carga total da célula 1 não puderam ser considerados.

## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Neste capítulo serão apresentados os resultados das modelagens numéricas, realizadas com auxílio do programa Vadose/W (GeoStudio, 2007), do fluxo de água e balanço hídrico em caso de cobertura do tipo barreira capilar dupla e outro caso do rejeito sem cobertura.

### 6.1 – Dados de entrada

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

- i) Malha de elementos finitos das camadas que compõem o sistema cobertura/rejeito;
- ii) Parâmetros de entrada de cada camada do sistema e
- iii) Condições de contorno e condições iniciais do sistema.

Para definição da malha do sistema cobertura/rejeito, é necessário definir a geometria do problema (espessuras, alturas, nº de camadas), tipo de elemento, 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 de retenção, dados de permeabilidade não saturada *versus* sucção e dados de condutividade térmica *versus* teor de umidade gravimétrico.

Como apresentado no capítulo 3, as curvas de retenção de água da argila e da cinza foram obtidas por UBALDO (2005) e MENDONÇA (2007). A curva do solo orgânico foi obtida através de ensaio em campo através de amostras inderformadas com medições com tensiômetros. Para o rejeito misturado a curva de retenção de água foi obtida empiricamente a partir da curva granulométrica. A curva de retenção do rejeito grosso foi obtida no ensaio da placa de sucção do presente trabalho, cujos pontos experimentais foram ajustados a equação VAN GENUCHTEN (1980), como já mencionado anteriormente. A figura 6.1, apresenta as curvas de retenção utilizadas na simulação numérica.

## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

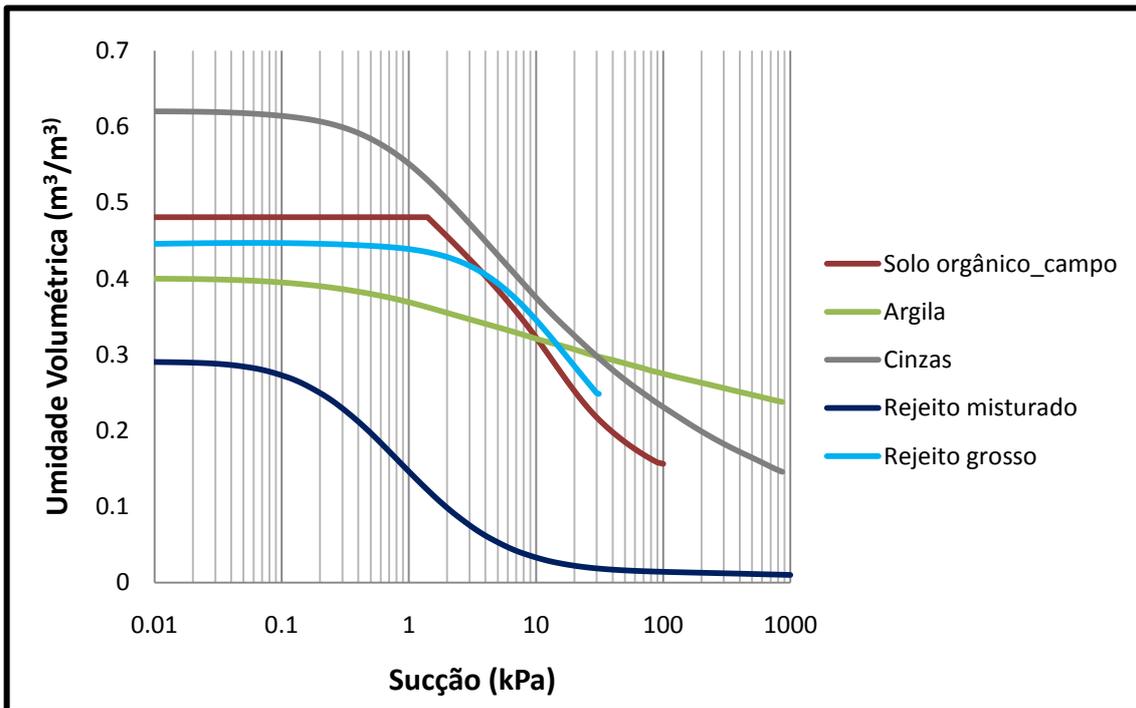


Figura 6.1 - Curva de retenção solo-água dos materiais estudados

Os dados referentes à permeabilidade saturada foram obtidos experimentalmente por UBALDO (2005), MENDONÇA (2007) e SOUZA *et al.*, 2008, cujos valores podem ser vistos na tabela 6.1.

**Tabela 6.1: Condutividade hidráulica saturada dos materiais estudados**

Material	Condutividade hidráulica saturada (m/s)
Rejeito grosso	$4 \times 10^{-3}$
Rejeito misturado*	$1 \times 10^{-6}$
Argila**	$3.25 \times 10^{-8}$
Cinzas***	$2.45 \times 10^{-6}$
Solo orgânico*	$2.78 \times 10^{-5}$

\*Ensaio realizado em campo através do método dos anéis concêntricos; \*\*Ensaio de carga variável (MENDONÇA, 2007); \*\*\*Ensaio de carga constante (UBALDO, 2005)

Com relação à permeabilidade não saturada, o programa VADOSE/W gera a curva de condutividade hidráulica não saturada versus sucção pelo método de FREDLUND *et al.* (1994), que utiliza a curva de retenção de água e o valor da permeabilidade saturada. Este método apresenta-se bem correlacionado com os dados experimentais. Estas curvas são apresentadas na figura 6.2.

## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

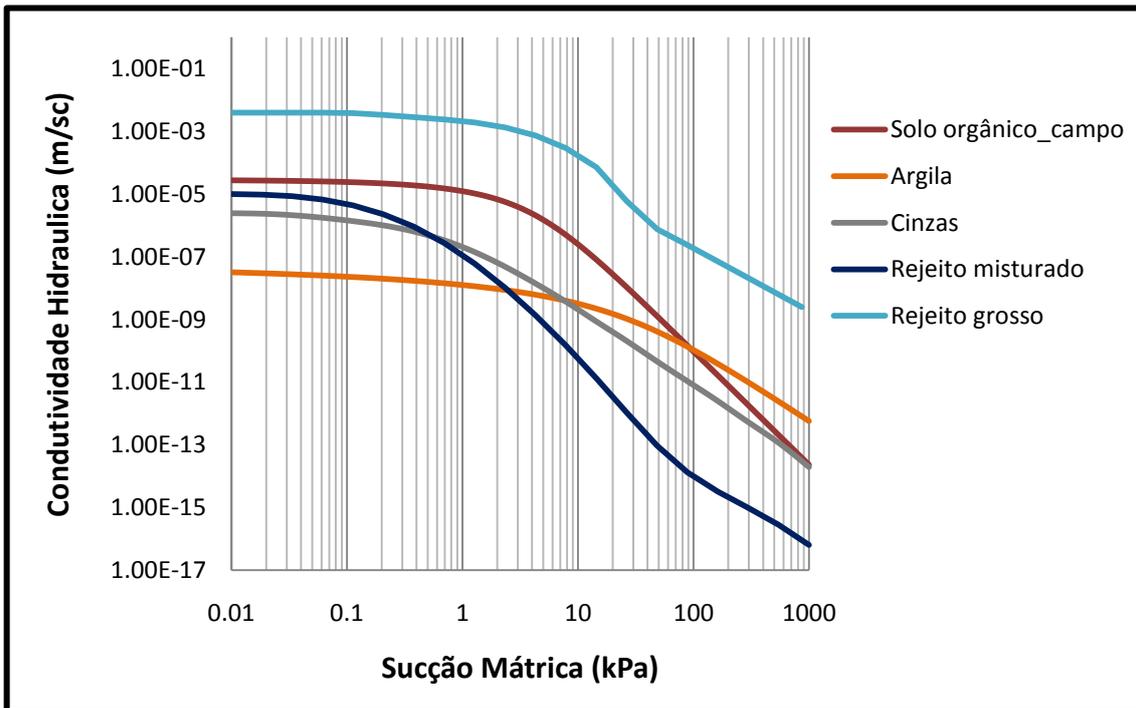


Figura 6.2: Condutividade hidráulica não saturada dos materiais

A fim de se fazer a análise transiente, adotou-se as seguintes condições iniciais:

- Para as camadas de cobertura do caso 2 definiram-se sucções constantes ao longo do perfil, de acordo com os dados obtidos em campo pelos sensores nos dia 1 de julho (período seco) e no dia 1 de outubro de 2008 (período úmido), como apresenta figura 6.3 e a tabela 6.2.
- Para a condição de contorno climática (figura 6.3), foram utilizados os dados meteorológicos provenientes da estação meteorológica instalada em campo, na estação experimental. Os dados utilizados foram de precipitação, umidade relativa do ar, temperatura e velocidade do vento, como apresentam as tabelas 6.3 e 6.4.
- Para a condição de contorno termal foram utilizadas as medidas de temperaturas obtidas em campo para cada camada nos dias das modelagens.
- Para a condição de contorno hidráulica considerou-se impermeáveis as laterais da cava e adotou-se poropressões nulas na base da cava (nível de água), como pode ser visto na figura 6.3.

# CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

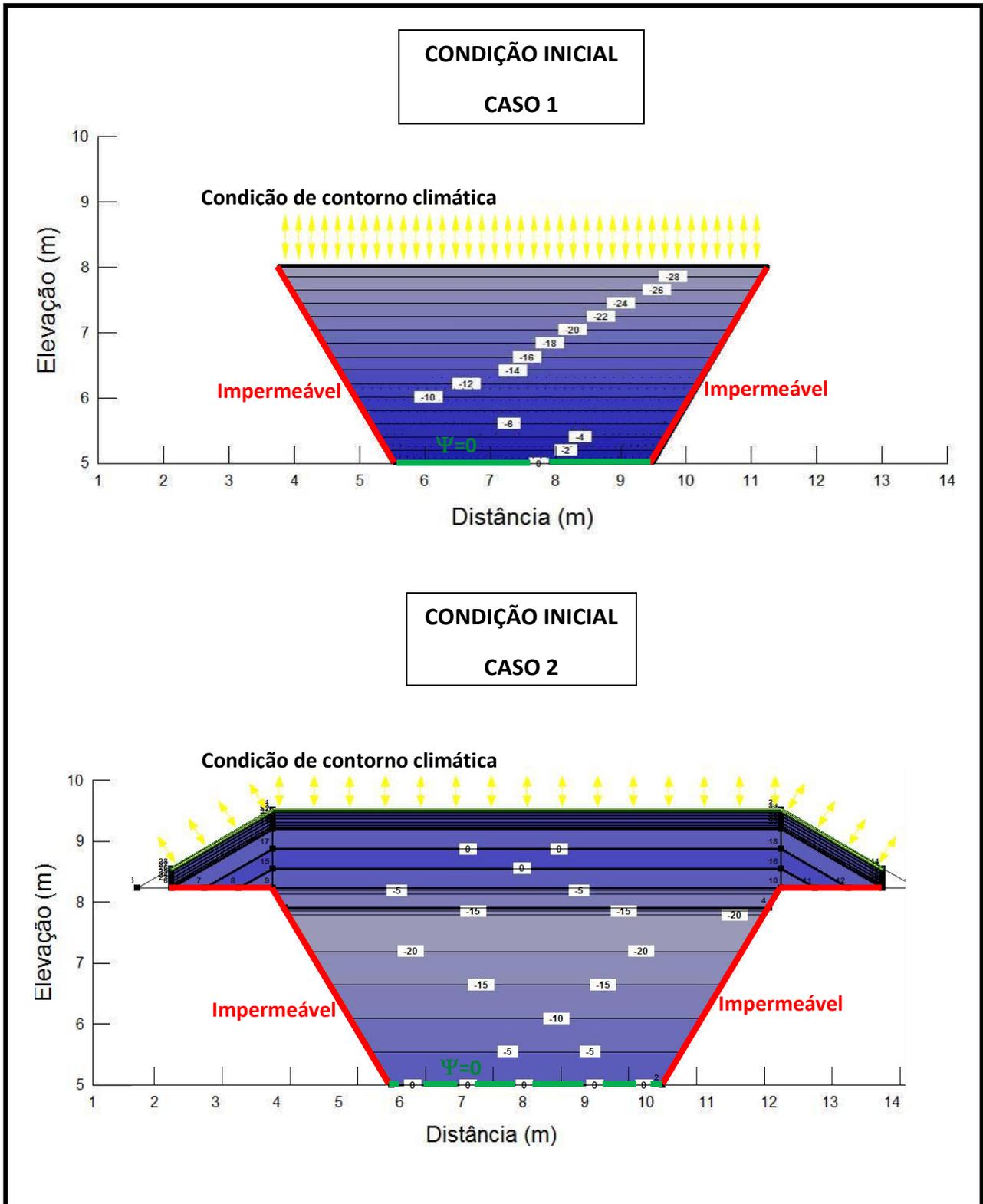


Figura 6.3: Condições iniciais de sucção e condição de contorno climática para o caso 1 e para o caso 2

## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

**Tabela 6.2 Dados de entrada para a condição Inicial**

<b>DADOS PARA CONDIÇÃO INICIAL DE CONTORNO</b>				
	<b>Temperatura (°C)</b>		<b>Carga Total</b>	
<b>Caso 1</b>	Julho	Outubro	Julho	Outubro
Rejeito Grosso	31.75	35.76	5	5
<b>Caso 2</b>				
Rejeito Grosso	16.88	19.27	5	5
Rejeito Misturado	15.73	19.42	-1.14	-1.27
Cinza Inferior	19.25	19.17	-0.19	-0.2
Argila	17	19	-0.17	-0.18
Cinza superior	17.34	19.68	-0.37	-0.36
Solo Orgânico	17	19	0	0

**Tabela 6.3: Dados climáticos do mês de Julho de 2008**

Data	Máx. Temp. (°C)	Mín.Temp. (°C)	RH Máx.(%)	RH Mín. (%)	Vel. Vento (m/s)	Chuva (mm)
1/7	15.0	14.7	100.0	75.6	0.2	0
2/7	14.3	13.6	79.1	69.7	0.5	0.2
3/7	14.8	14.4	99.8	56.5	0.4	4.2
4/7	16.0	15.7	89.9	68.1	0.6	0
5/7	16.8	16.1	70.4	70.0	0.5	0
6/7	15.1	14.2	81.0	58.0	0.3	0.2
7/7	17.9	17.1	65.7	45.0	1.9	0.2
8/7	17.3	16.6	85.7	72.8	0.8	1
9/7	16.4	15.9	100.0	70.3	0.4	0.2
10/7	17.8	17.1	85.4	78.7	0.5	0.2
11/7	18.2	17.4	64.8	57.8	1.9	0.2
12/7	15.1	14.2	91.5	58.7	0.5	0
13/7	16.4	15.4	78.6	48.8	1.0	0.2
14/7	18.3	17.3	63.5	45.3	0.4	0
15/7	17.6	16.6	73.7	42.5	0.9	0
16/7	14.1	13.0	79.8	39.3	0.3	0
17/7	12.8	11.7	83.4	39.0	0.2	0.2
18/7	15.6	14.4	79.9	43.9	0.7	0.2
19/7	14.2	13.6	95.2	55.2	0.0	0
20/7	16.3	16.1	77.0	71.3	0.0	0
21/7	17.8	17.2	75.3	72.5	0.0	0.2
22/7	19.9	18.9	66.8	62.9	0.3	0.4
23/7	15.4	14.5	87.7	44.3	0.0	0
24/7	16.3	15.8	94.7	52.4	0.0	0
25/7	11.9	11.1	76.5	36.7	0.2	0
26/7	11.4	10.6	91.3	52.4	0.1	0
27/7	15.1	14.5	93.2	67.0	0.0	2.6
28/7	15.3	15.0	95.2	82.4	0.0	0.4
29/7	17.0	16.6	89.0	62.0	0.0	0
30/7	18.4	18.1	92.7	71.4	0.1	9.6
31/7	15.3	15.1	100.0	57.4	0.0	5.2
<b>Total</b>						<b>25.4</b>

## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Fonte: Estação Meteorológica da Estação Experimental (2008)

**Tabela 6.4: Dados climáticos de Outubro de 2008**

Data	Máxima Temperatura (°C)	Mínima Temperatura (°C)	RH Máxima (%)	RH Mínima (%)	Vento Velocidade (m/s)	Chuva (mm)
1/10	20.9	20.2	79.9	57.0	0.6	1.0
2/10	21.0	20.4	78.6	67.0	1.2	8.8
3/10	17.8	17.1	67.2	49.6	0.7	0.2
4/10	17.7	17.3	86.3	73.3	0.6	0.4
5/10	17.1	16.5	81.9	78.6	1.4	2.2
6/10	16.3	15.7	76.5	58.0	0.3	0.0
7/10	16.5	15.7	70.0	41.6	1.7	0.0
8/10	15.6	14.9	68.6	19.6	0.7	0.0
9/10	16.4	15.7	65.5	23.3	2.1	0.0
10/10	18.0	17.2	82.8	37.6	1.6	0.0
11/10	18.7	18.0	78.1	70.7	0.4	9.6
12/10	20.1	19.4	71.2	65.8	0.3	0.0
13/10	22.4	21.6	78.2	60.5	0.5	2.6
14/10	22.1	21.4	91.2	78.2	0.7	2.4
15/10	20.4	19.9	100.0	98.8	0.7	15.8
16/10	19.4	18.9	100.0	93.2	3.9	5.8
17/10	17.3	16.8	100.0	58.9	3.0	33.0
18/10	15.7	15.1	100.0	43.1	0.4	25.0
19/10	16.8	16.2	80.8	68.5	1.0	0.2
20/10	19.8	19.1	85.1	59.5	1.3	0.0
21/10	23.1	22.3	81.8	50.8	2.1	0.0
22/10	23.8	23.1	96.4	58.7	1.1	1.6
23/10	21.1	20.5	97.8	84.0	0.8	14.8
24/10	20.1	19.7	100.0	91.7	1.7	0.8
25/10	20.6	20.2	100.0	100.0	1.7	25.8
26/10	20.8	20.3	100.0	90.5	2.1	70.6
27/10	20.3	19.7	88.9	70.0	2.2	0.0
28/10	18.9	18.5	81.9	71.8	1.7	0.0
29/10	19.3	18.9	97.0	88.1	1.4	8.4
30/10	20.2	19.8	85.1	61.2	1.7	0.6
31/10	19.2	18.7	81.4	49.4	1.5	0.0
<b>Total</b>						<b>229.6</b>

Fonte: Estação Meteorológica da Estação Experimental (2008)

Os meses de julho e outubro correspondem respectivamente, ao mês de menor e maior índice pluviométrico do ano de 2008. O critério de escolha é o mesmo abordado no capítulo 4, no entanto, devido à quantidade de dados, optou-se por analisar somente um mês para cada período escolhido para as análises de campo.

# CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

## 6.2 – Resultados da modelagem

A fim de simplificar os resultados e as análises foram escolhidos os dias em que ocorreram chuvas significativas e períodos mais secos do nos meses de julho (período seco) e outubro (período úmido). Essas escolhas foram feitas para facilitarem a visualização do fluxo de água para dentro do rejeito. A figura 6.3 apresenta a precipitação dos meses utilizados nas análises.

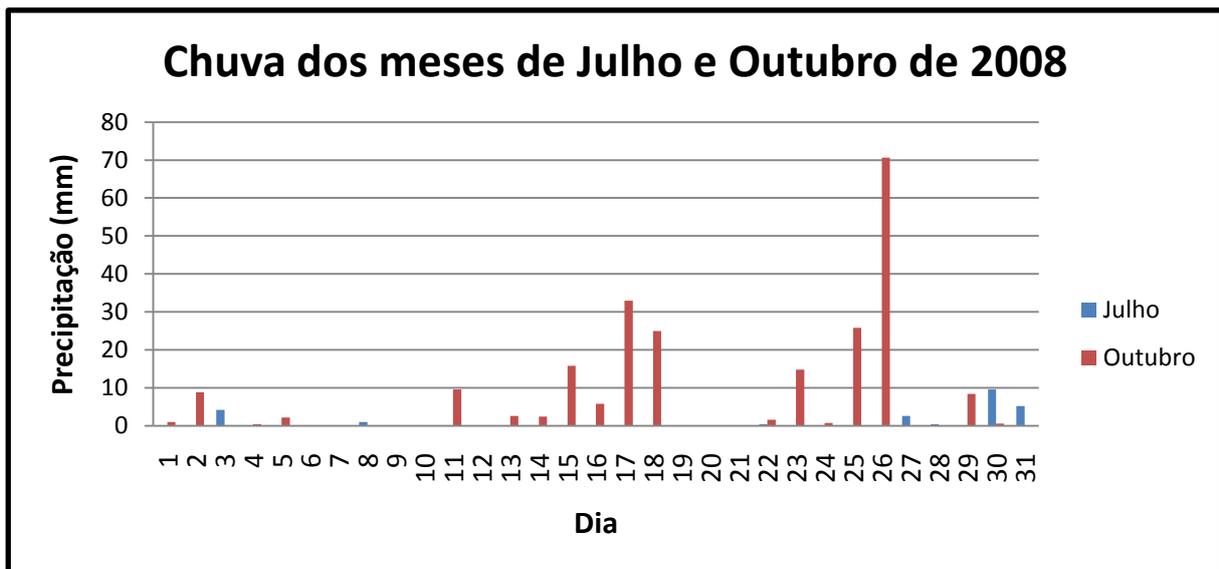


Figura 6.4: Precipitação nos meses de Julho e Outubro de 2008 (Fonte: Estação Meteorológica da Estação Experimental)

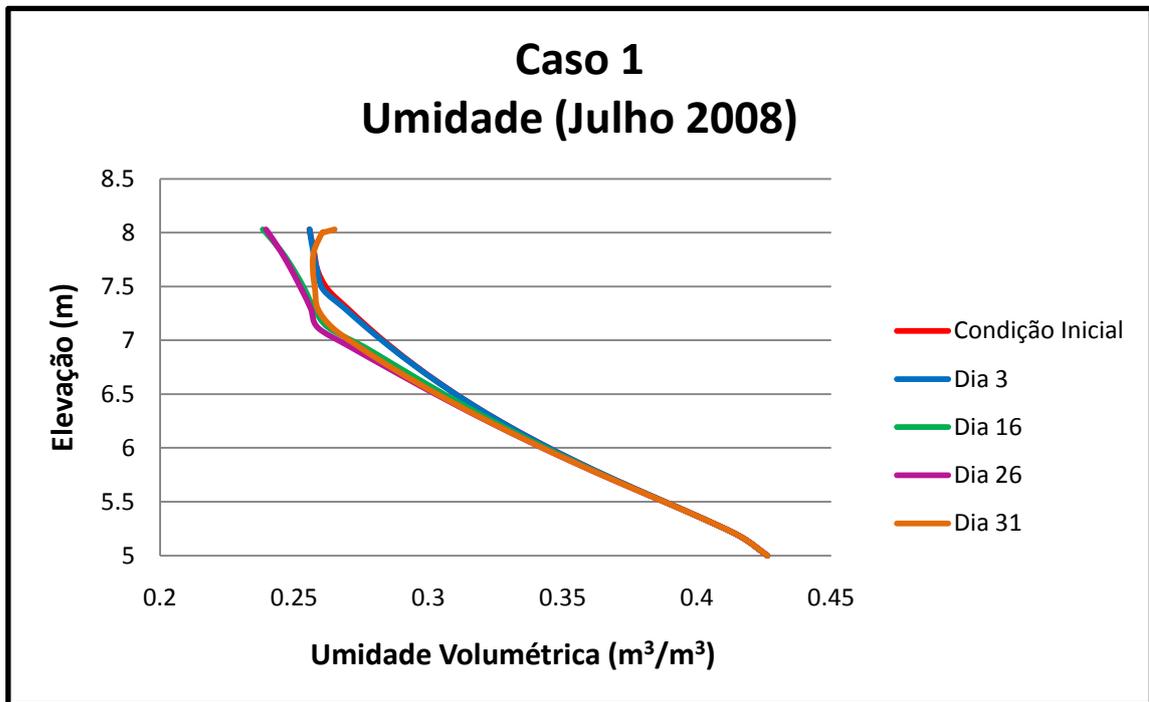
A modelagem considerou para todos os casos uma condição inicial e foram selecionados no mês de julho os dias 3, 16, 26 e 31 e para o mês de outubro os dias selecionados foram 2, 10, 18, 21, 26 e 31, cujas precipitações foram apresentadas nas tabelas 6.1 e 6.2, anteriormente. A seguir serão apresentados os perfis de sucção e umidade e o balanço hídrico dos dois casos divididos por mês.

### 6.2.1 – Mês de Julho de 2008

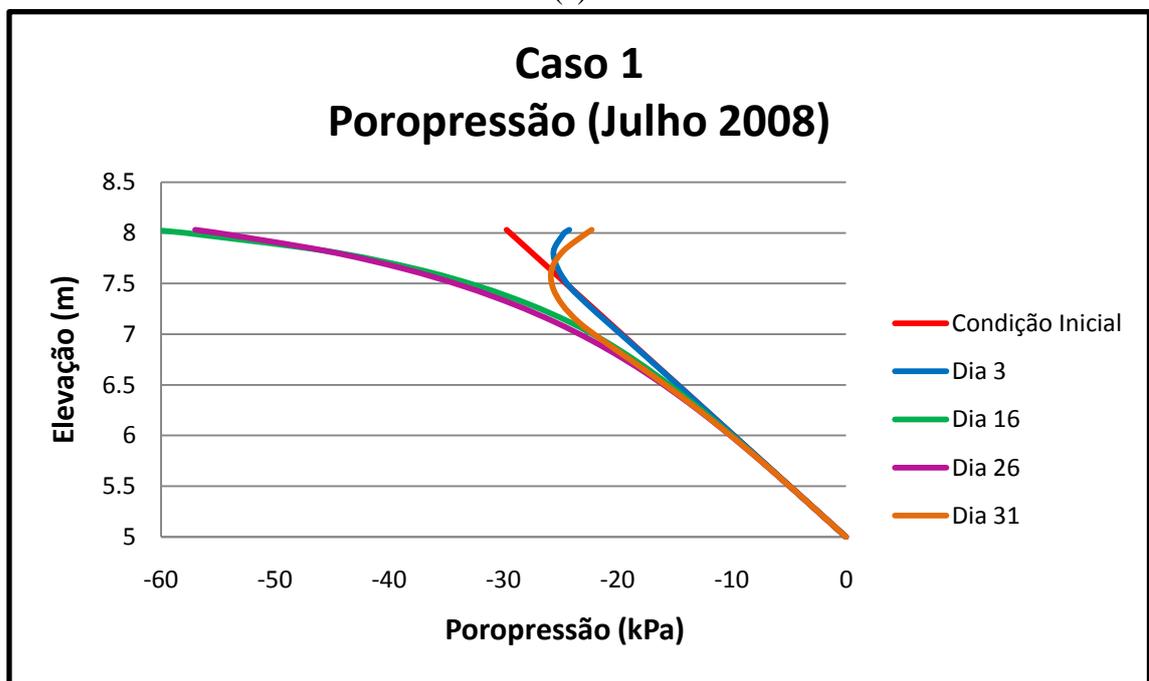
O mês de Julho representa o período de dias onde houve baixo índice pluviométrico com 25,4 mm, representando o mês do ano de 2008 com menor índice. A figura 6.5 apresenta o perfil de umidade e poropressão para o caso 1 - rejeito sem

## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

cobertura cuja função é servir de referencial uma vez que representa a deposição do rejeito grosso proveniente do beneficiamento do carvão sem nenhum tipo de sistema de cobertura.



(a)



(b)

Figura 6.5: Perfis de umidade e poropressão ao longo da elevação nos dias do mês de Julho para o caso 1. (a) Perfis de umidade; (b) Perfis de poropressões.

## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

De acordo com os perfis de umidade do mês de Julho para o caso 1, nota-se que o teor de umidade varia de acordo com a precipitação diária próximo a superfície. Nos dias 16 e 26, com a ocorrência de nenhuma chuva, a umidade volumétrica foi menor, tendo comportamento inverso para o dia 31, cuja precipitação foi 5,2 mm somados a precipitação do dia anterior de 9,6, aumentando o teor de umidade. Inversamente proporcional ao teor de umidade, a sucção nos dias sem ocorrência de chuva elevou-se e o contrario ocorreu com os dias com precipitação. O dia 16 apresentou uma maior poropressão do que os outros dias devido baixa precipitação nos 5 dias anteriores (0,2 mm).

O balanço hídrico, de uma forma simplificada, consiste na contabilização das entradas e saídas de líquidos em um sistema. O balanço hídrico originado pelo VADOSE/W utiliza os dados acumulados de precipitação, run-off, água percolada, água armazenada e evaporação, cujos dados estão representados na figura 6.6 do modelo.

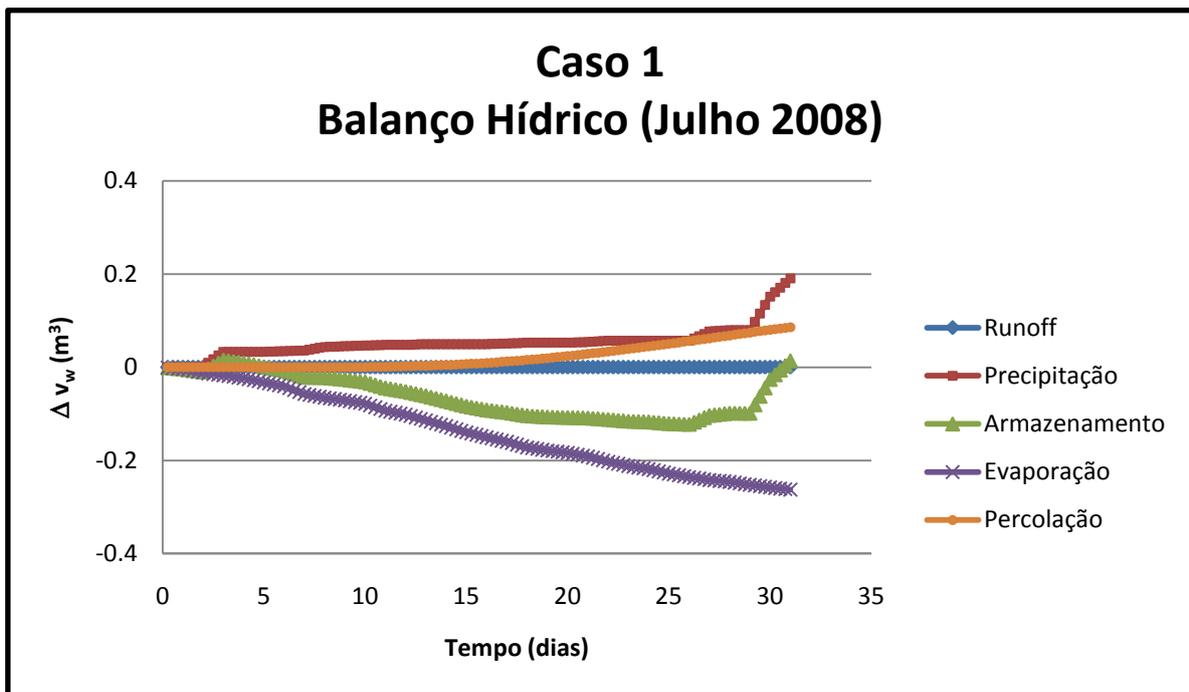


Figura 6.6: Balanço hídrico (variação do volume de água) acumulado no rejeito sem cobertura (caso 1)

Segundo os resultados obtidos na simulação (figura 6.6), precipitou 190,5 litros de chuva sobre o rejeito sem cobertura, não houve Run-off, a evaporação foi 262,8 litros, a percolação foi de 86 litros e o armazenamento foi de 13,4 litros.

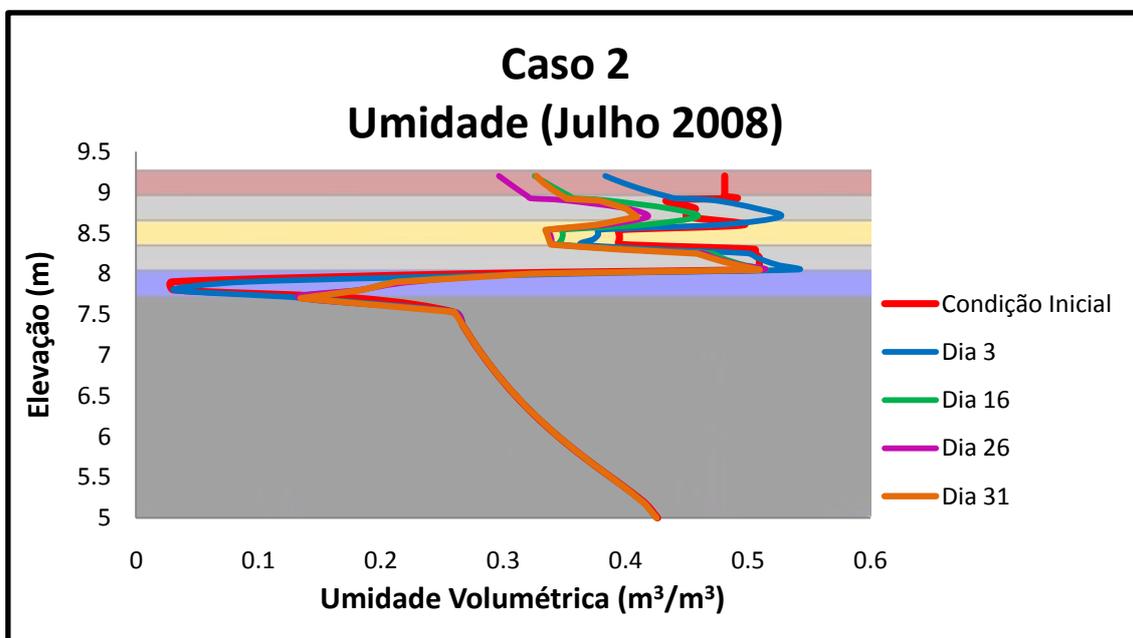
## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O caso 2, possui um sistema de cobertura tipo barreira capilar dupla cujas características já foram abordadas anteriormente. A figura 6.7 apresenta a distinção de cada camada da célula e suas dimensões.

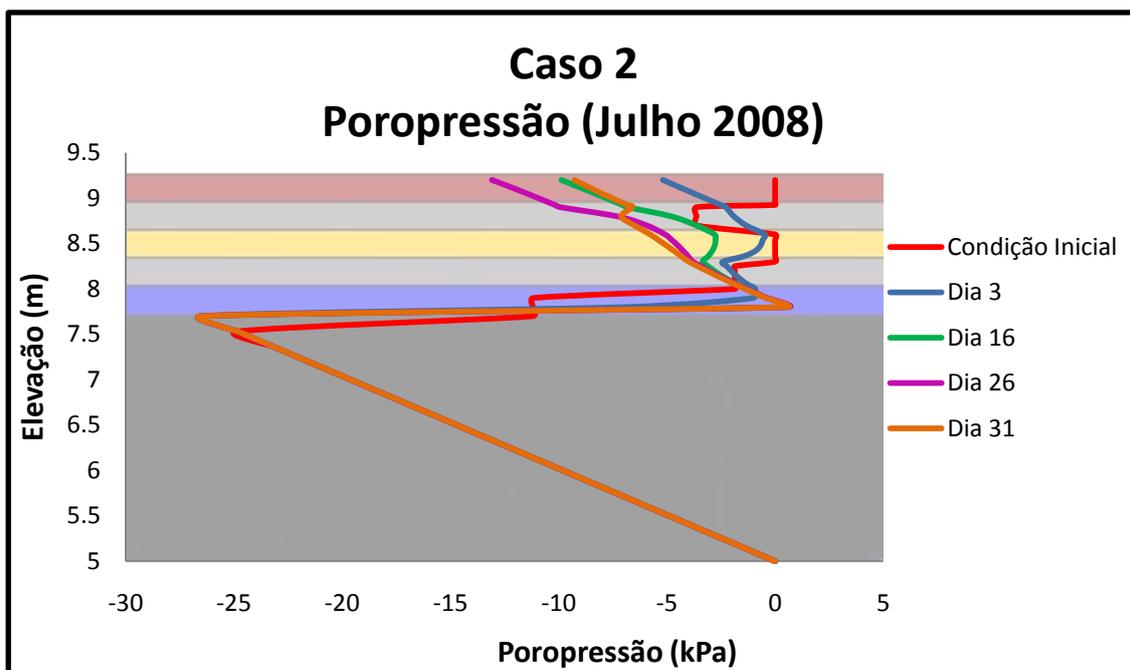


Figura 6.7: Camadas rejeito / cobertura representativas do caso 2.

Os perfis de umidade e poropressão do caso 2 para o mês de Julho estão representados na figura 6.8.



(a)



(b)

Figura 6.8: Perfis de umidade e poropressão ao longo da elevação nos dias do mês de Julho para o caso 2. (a) Perfis de umidade; (b) Perfis de poropressões.

Observando o perfil de umidade, é possível perceber que na camada de rejeito grosso há pouca variação da umidade com o tempo e a profundidade e as variações ocorre perto da área de transição entre o rejeito grosso e o rejeito misturado. A pouca variação do perfil de umidade, também é visível nas camadas de cinza inferior e argila, o mesmo não ocorrendo nas camadas de cinza superior e solo orgânico. Estas duas ultimas camadas, apresentaram variações de acordo com a precipitação.

O teor de umidade na condição inicial (primeiro dia de julho) apresentou-se elevado nas camadas superiores devido a precipitações ocorridas nos dias 28 e 30 de junho que somadas chegam a 23,4 mm. A camada de solo orgânico apresentou o teor de umidade saturado na condição inicial com umidade volumétrica cerca de 48% e a cinza superior apresentou elevado teor de umidade (entre 45 a 50%).

Um ponto extremamente importante para o bom funcionamento de um sistema de cobertura do tipo barreira capilar é a saturação da camada argilosa, apresentada na figura 6.9. Na figura 6.8 (a) é possível perceber que mesmo no mês com baixa precipitação, como o caso do mês de Julho, a camada de argila apresentou grau de

## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

saturação acima de 84%. A figura 6.8 mostra o grau de saturação em um determinado ponto na metade da camada de argila a uma elevação de 3,45 m (na figura a 8,45 m).

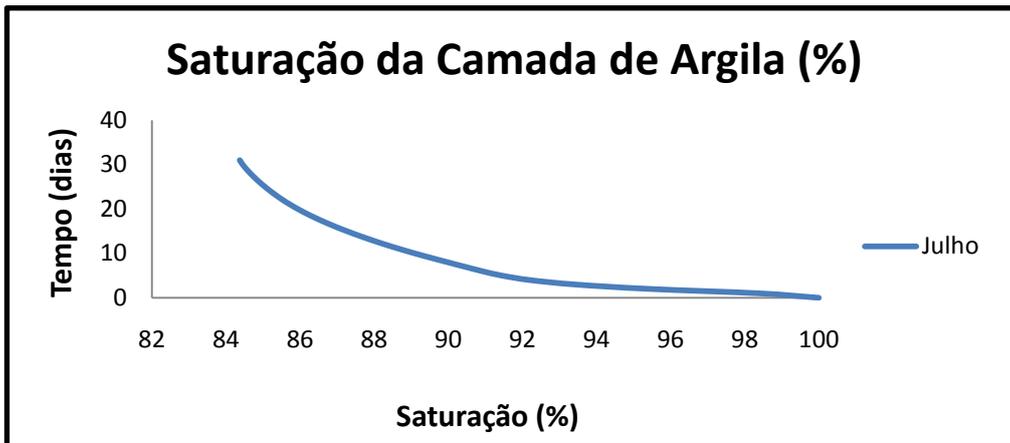


Figura 6.9: Saturação da camada de argila para o caso 1 no mês de Julho de 2008.

De acordo com os perfis de poropressão (figura 6.8 (b)), é possível perceber que as sucções na camada de rejeito grosso não apresentaram grandes modificações ao decorrer dos dias e com as precipitações. Nota-se que, em comparação com o caso 1, a ocorrência de fluxo para dentro do rejeito é relativamente inferior.

É possível perceber que as sucções, assim como as umidades, variam de acordo com as precipitações diárias nas camadas mais superficiais. Nas camadas de argila, cinza inferior, rejeito misturado as sucções se mantiveram entre 0 e -10.

Observa-se na figura 6.10 que no mês seco, de acordo com a modelagem, sobre o caso 2 precipitou 267 litros de chuva, evaporou 550 litros, houve um runoff de 81,23 litros, percolou 156,67 litros e ficou armazenado 521,27 litros de água no perfil.

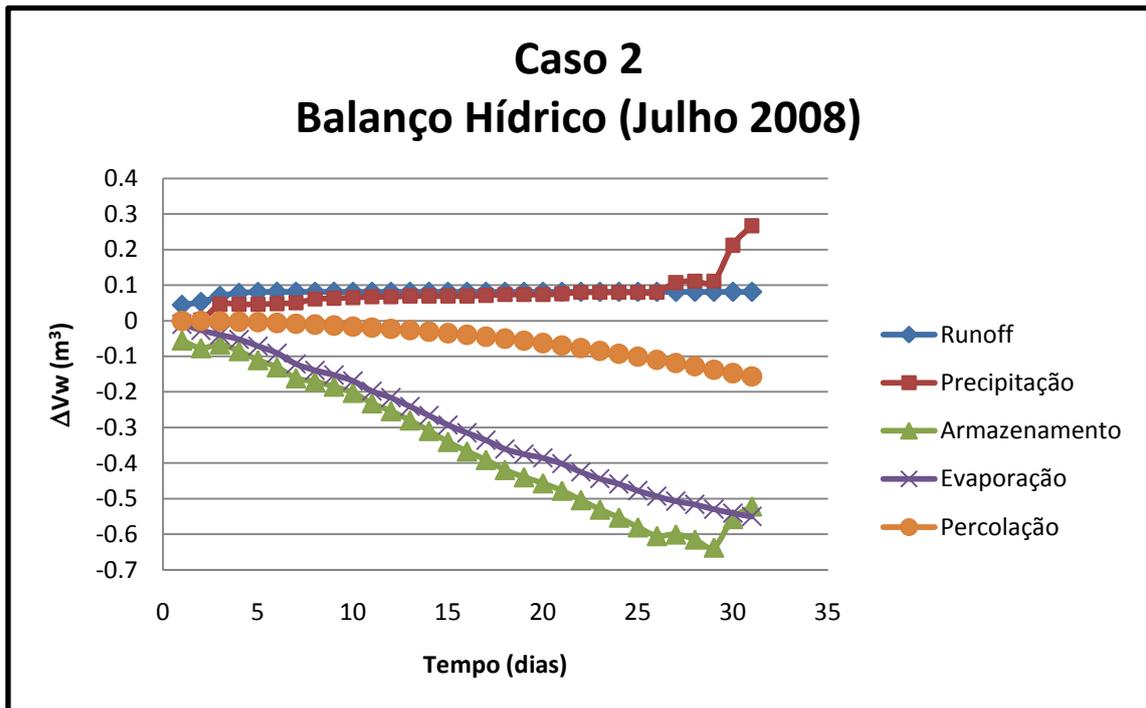


Figura 6.10: Balanço hídrico (variação do volume de água) acumulado no rejeito com cobertura do tipo barreira capilar dupla (caso 2).

Comparando os dados de balanço hídrico dos casos 1 e 2 para o mês de Julho, é possível notar que houve uma redução de água percolada de cerca de 45 %.

### 6.2.2 – Mês de Outubro de 2008

O mês de outubro representa o período de dias onde houve elevado índice pluviométrico com 229,6 mm, representando o mês do ano de 2008 com maior índice. A figura 6.12 apresenta o perfil de umidade e poropressão para o caso 1 - rejeito sem cobertura.

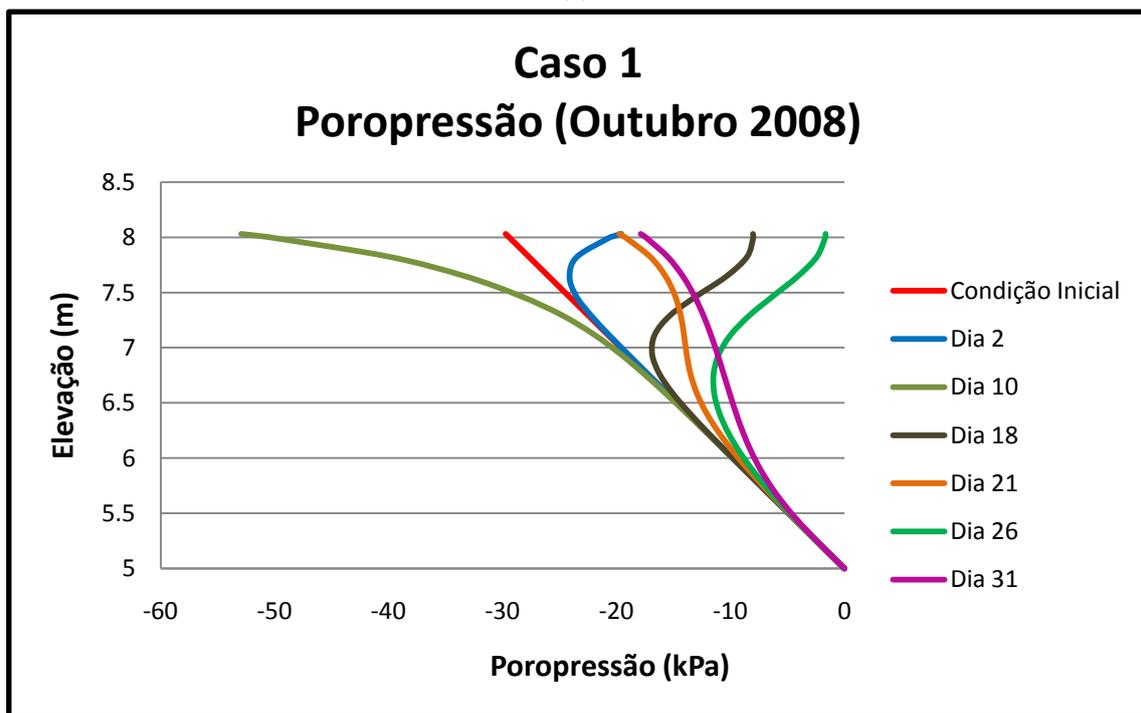
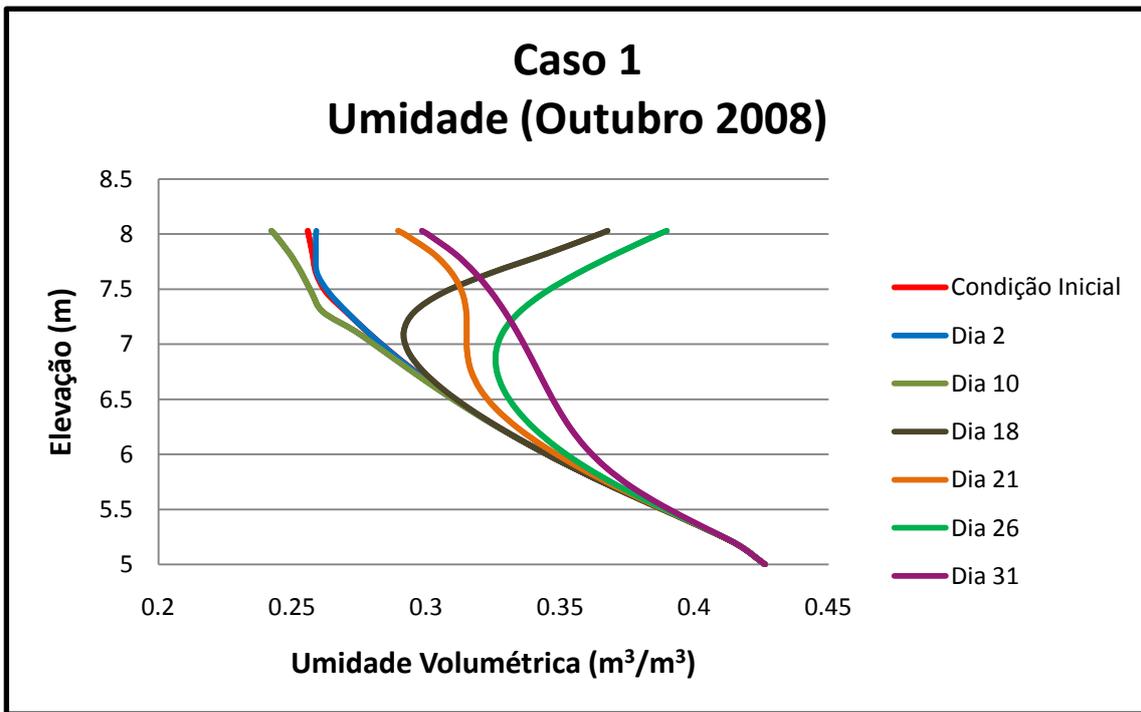


Figura 6.12: Perfis de umidade e poropressão ao longo da elevação nos dias do mês de Outubro para o caso 1. (a) Perfis de umidade; (b) Perfis de poropressões.

De acordo com os perfis de umidade do mês de Outubro para o caso 1, nota-se que o teor de umidade varia de acordo com a precipitação diária, não somente na superfície como no caso 1, mas também ao longo da profundidade.

## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Na condição inicial e nos dias 2 e 10, a umidade foi menor, estando de acordo com a precipitação destes dias. Percebe-se que na condição inicial e no dia 2, há pouca variação do teor de umidade, quase imperceptível, causada por 8,8 mm de chuva do dia 2. No dia 10 porém, devido a falta de chuva nos quatro dias anteriores, a umidade diminuiu variando somente na parte mais superficial do rejeito.

Ao decorrer dos dias com a presença de chuva e com uma chuva de 25 mm no dia 18, a umidade aumentou consideravelmente, variando bastante nas partes mais superficiais do rejeito, visto que nos cinco dias anteriores chueu consecutivamente, alcançando um total de 59,6 que somadas ao dia 18 chegam a 59,6 mm. Após estes dias com chuva, houve um período de dias com baixa precipitação, onde é possível perceber que no dia 21 o teor de umidade volta a baixar.

Como a umidade está relacionada a quantidade de água presente no rejeito, no dia 26 com precipitação de 70 mm associados a quatro consecutivos de chuva, somando um total de 43 mm, ou seja, ao final de cinco dias houve uma precipitação de 103 mm, o teor de umidade voltou a aumentar chegando próximo a saturação do rejeito grosso na parte mais superficial.

A poropressão como já mencionado, varia de forma inversa a umidade. Desta forma, os dias com baixa precipitação apresentam elevada sucção (poropressão negativa), alcançando valor de -50 kPa no dia 10 nas áreas próximo a superfície. Como a umidade, a poropressão variou em partes mais profundas do rejeito, diferente do caso 1 no período de Julho (mais seco).

O balanço hídrico obtido pelo VADOSE/W, está representado na figura 6.12. Segundo esta simulação, a precipitação ocorrida no mês de outubro para o caso 1 foi 1722 litros, onde não houve escoamento superficial, evaporou cerca de 336 litros, houve uma percolação de 1387 e ficou armazenado cerca de 0,5 litro.

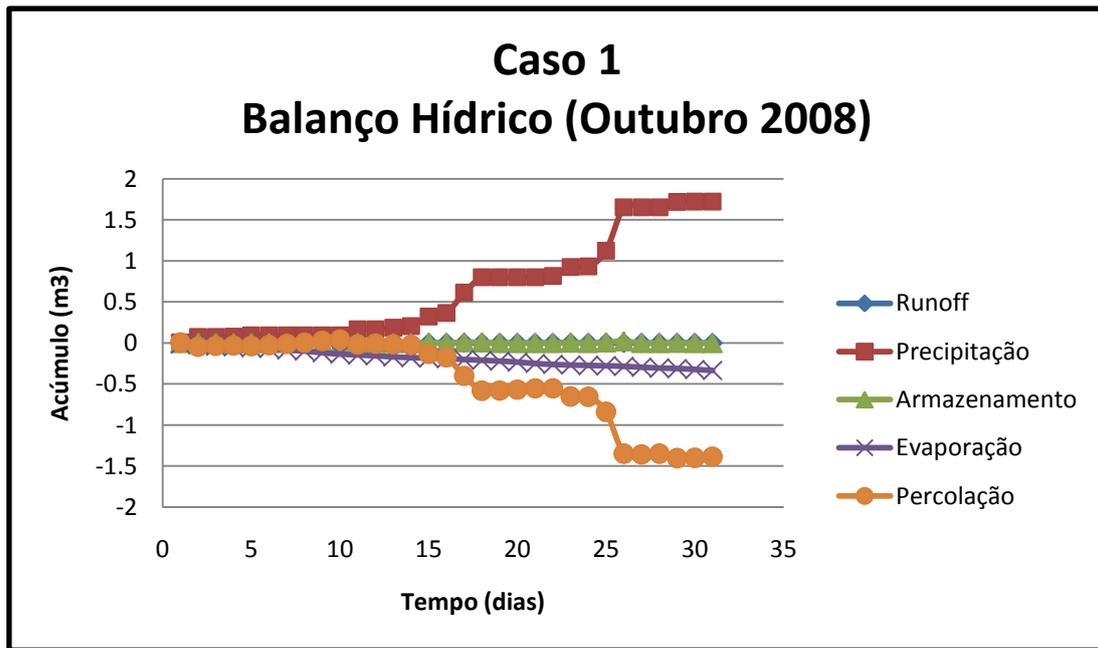
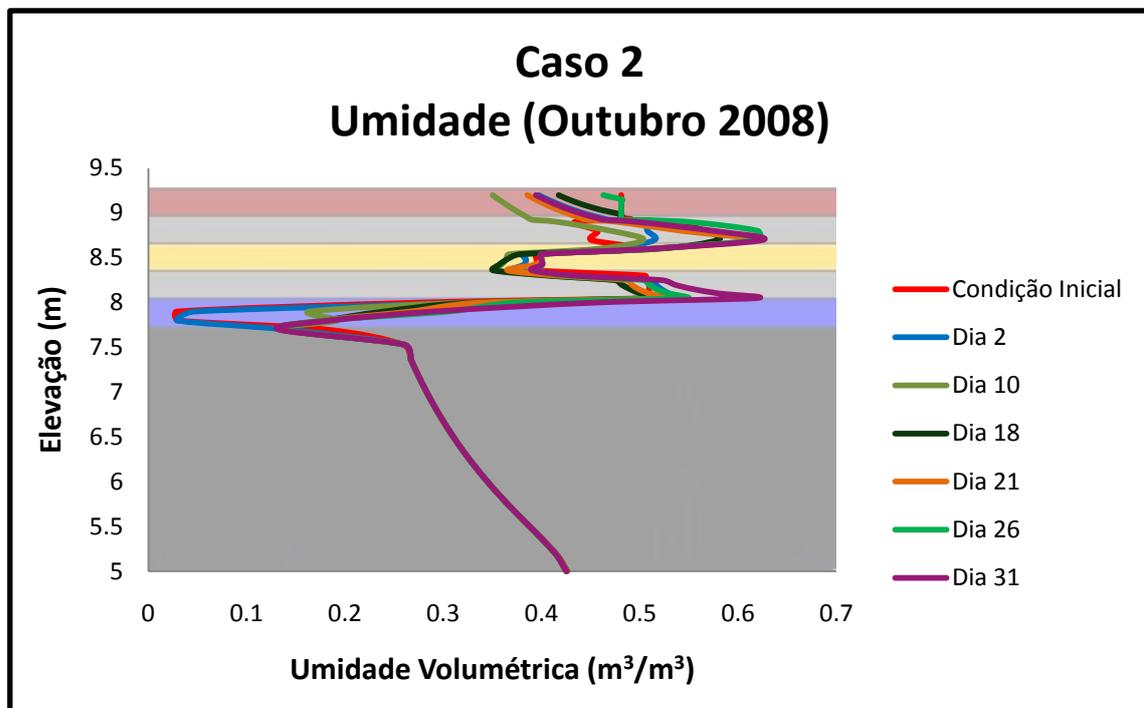
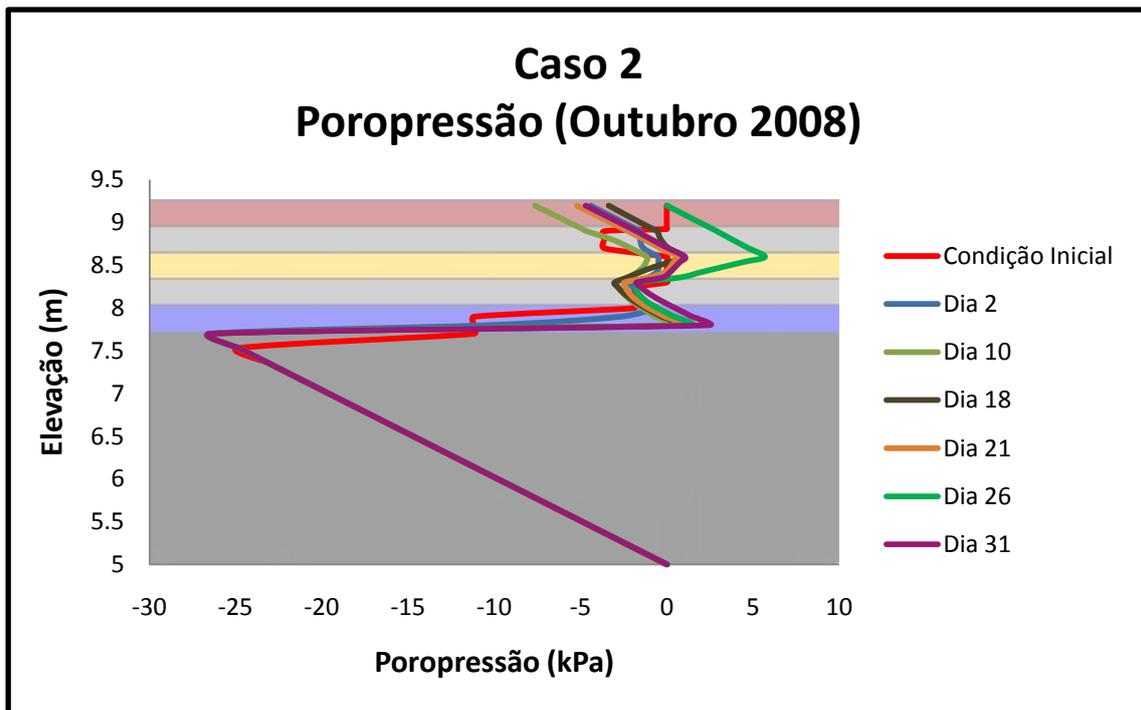


Figura 6.12: Balanço hídrico (variação do volume de água) acumulado no rejeito sem cobertura do (caso 1)

Para o mês com maior precipitação, os perfis de umidade e poropressão do caso 2 estão apresentados na figura 6.13. A configuração das camadas é idêntica ao apresentado no mês anterior para o caso 2.



(a)



(b)

Figura 6.13: Perfis de umidade e poropressão ao longo da elevação nos dias do mês de Outubro para o caso 2. (a) Perfis de umidade; (b) Perfis de poropressões.

Neste período, o teor de umidade para o solo orgânico ficou entre 36 a 48%. Esta camada começou o período do mês de outubro na condição saturada e mesmo com a variação de chuva, o teor de umidade não variou muito nesta camada mais superficial. Já a camada de cinza superior alcançou a saturação devido às chuvas mais elevadas a partir do dia 18.

A camada de argila, apesar da quantidade de chuva, não apresentou grandes variações ficando na condição saturada ou próximo a ela durante todo o mês, com umidades em torno de 35 a 41%. A camada de cinza inferior também não apresenta grandes variações de umidade, ressaltando-se a saturação desta camada com precipitação do dia 18. No entanto, esta condição não saturou a camada de rejeito misturado e pouco influenciou o rejeito grosso, testificando que apesar da elevada precipitação a água não penetra no rejeito grosso, diminuindo a geração da drenagem ácida.

Mesmo com a elevada precipitação do mês de Outubro é possível perceber que o rejeito grosso mantém o teor de umidade volumétrica constante, variando apenas na superfície de contato com a camada de rejeito misturado, de forma similar ao comportamento do mesmo no mês de Julho.

## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Outro ponto importante a ser ressaltado é a saturação da camada argilosa. Como já apresentado anteriormente, mesmo com a baixa precipitação como no mês de Julho, esta camada permaneceu na condição própria para impedir o fluxo de oxigênio. No mês de outubro o grau de saturação da camada de argila pode ser visto na figura 6.14.

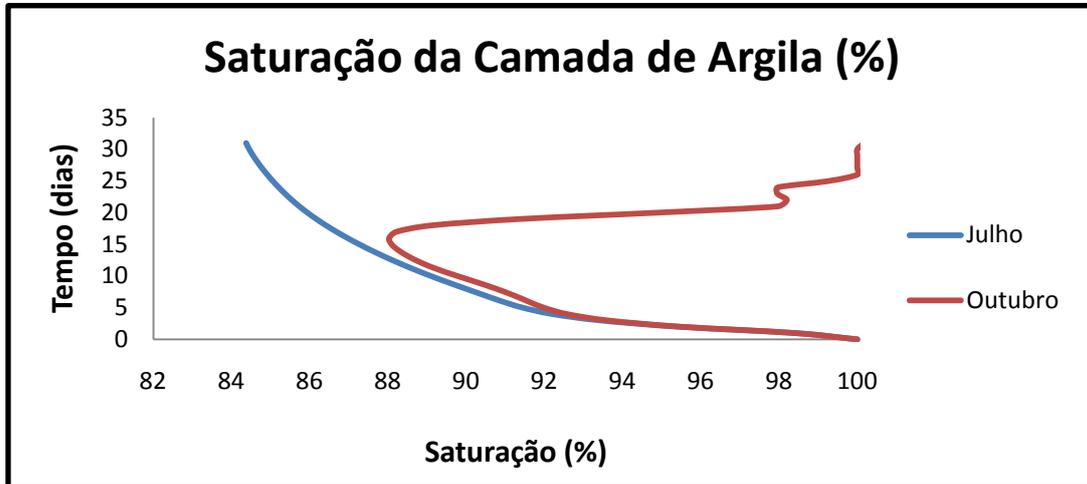


Figura 6.14: Grau de saturação da camada argilosa em Julho e Outubro de 2008.

Nota-se que a saturação da camada de argila diminuiu até cerca do décimo quinto dia do mês de Outubro e com o aumento da quantidade de chuva (dias 18 e 26), a saturação aumenta, alcançando 100% no final do mês. Ressalta-se que mesmo com a baixa precipitação do começo do mês de outubro, a saturação da camada não passa de 88%, evidenciando a eficiência deste sistema de cobertura.

Quanto à poropressão, percebe-se que o comportamento das camadas mais superficiais apresenta até 6 kPa de poropressões, devido à elevada precipitação do mês. Na camada de solo orgânico, como já abordado, possui na condição inicial o teor de umidade saturado, e por isso apresenta poropressão zero.

Com a chuva do dia 26 é possível ver que a camada de cinza superior e de argila apresentam poropressões positivas de 3 a 5,5 kPa, devido à quantidade de água presente. As sucções da camada de cinza inferior ficaram entre -2,6 (no meio da camada) a 0 (no contato com as camadas de argila e rejeito misturado).

A camada de rejeito misturado apresentou poropressões positivas nos dias com elevada precipitação, no entanto, estas não influenciaram na poropressão do rejeito grosso cujo comportamento foi semelhante ao do mês de Julho, apresentando sucções cerca de 25 kPa na área de contato com o rejeito misturado.

## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O balanço hídrico obtido para o caso 2 no mês de Outubro, representado na figura 6.15, mostra que precipitou 2413 litros de chuva, 1276 litros foram escoados superficialmente (Run-off), a evaporação foi de 493 litros, houve uma percolação de 261 litros e ficou armazenado cerca de 490 litros.

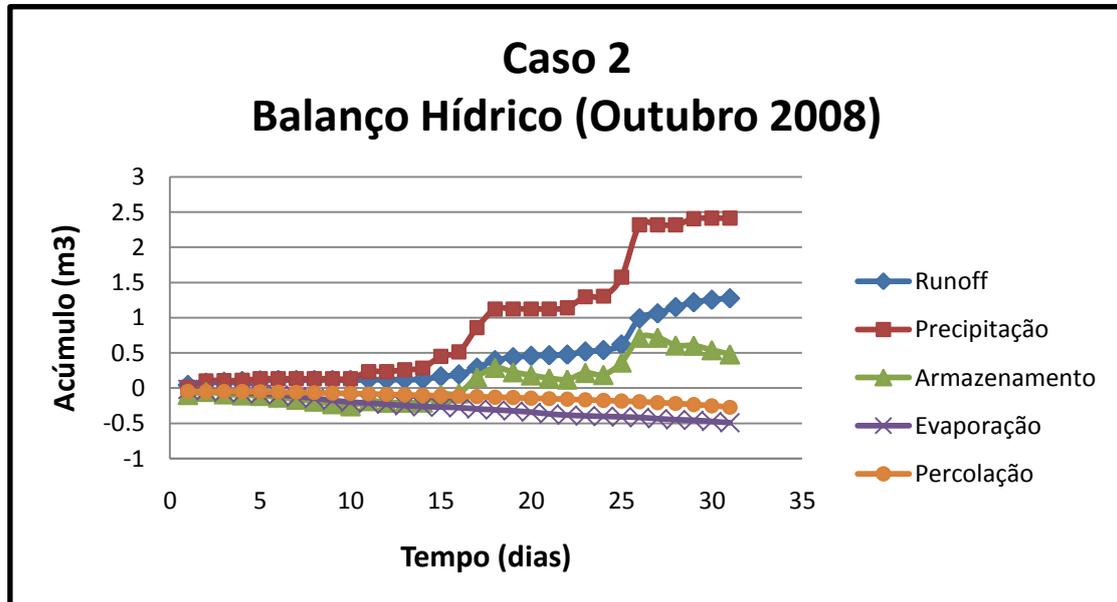


Figura 6.15: Balanço hídrico (variação do volume de água) acumulado no rejeito com cobertura do tipo barreira capilar dupla (caso 2)

Considerando o balanço hídrico de ambos os casos para o mês de Outubro, percebe-se que o sistema de cobertura do tipo barreira capilar dupla reduziu a infiltração cerca de 80 % no período com elevada precipitação. Isto demonstra o bom desempenho deste tipo de cobertura.

Sobre o balanço hídrico no sistema de cobertura tipo barreira capilar é importante ressaltar que: a evaporação, tanto no mês de Julho quanto no mês de Outubro, variou entre 493 a 550 litros; no mês chuvoso (outubro) a precipitação de chuva foi quase dez vezes maior que a precipitação no mês seco (Julho); o armazenamento de água foi negativo no mês seco e positivo no mês chuvoso e a percolação, no mês com alta pluviosidade foi de 260 litros, aproximadamente, e duas vezes maior que no mês seco.

### 6.3 – Comparação entre os resultados de campo e modelagem

## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Para a comparação entre os resultados gerados em campo e os resultados obtidos na modelagem, selecionou-se dois para o mês de julho e dois dias para o mês de outubro de acordo com a precipitação. Os dias selecionados e a sua precipitação podem ser vistos na tabela 6.7.

**Tabela 6.5: Dias selecionados e suas respectivas precipitações no ano de 2008**

Dia	Precipitação (mm)
26 de Julho	0
31 de Julho	5,2
10 de Outubro	0
26 de Outubro	70,6

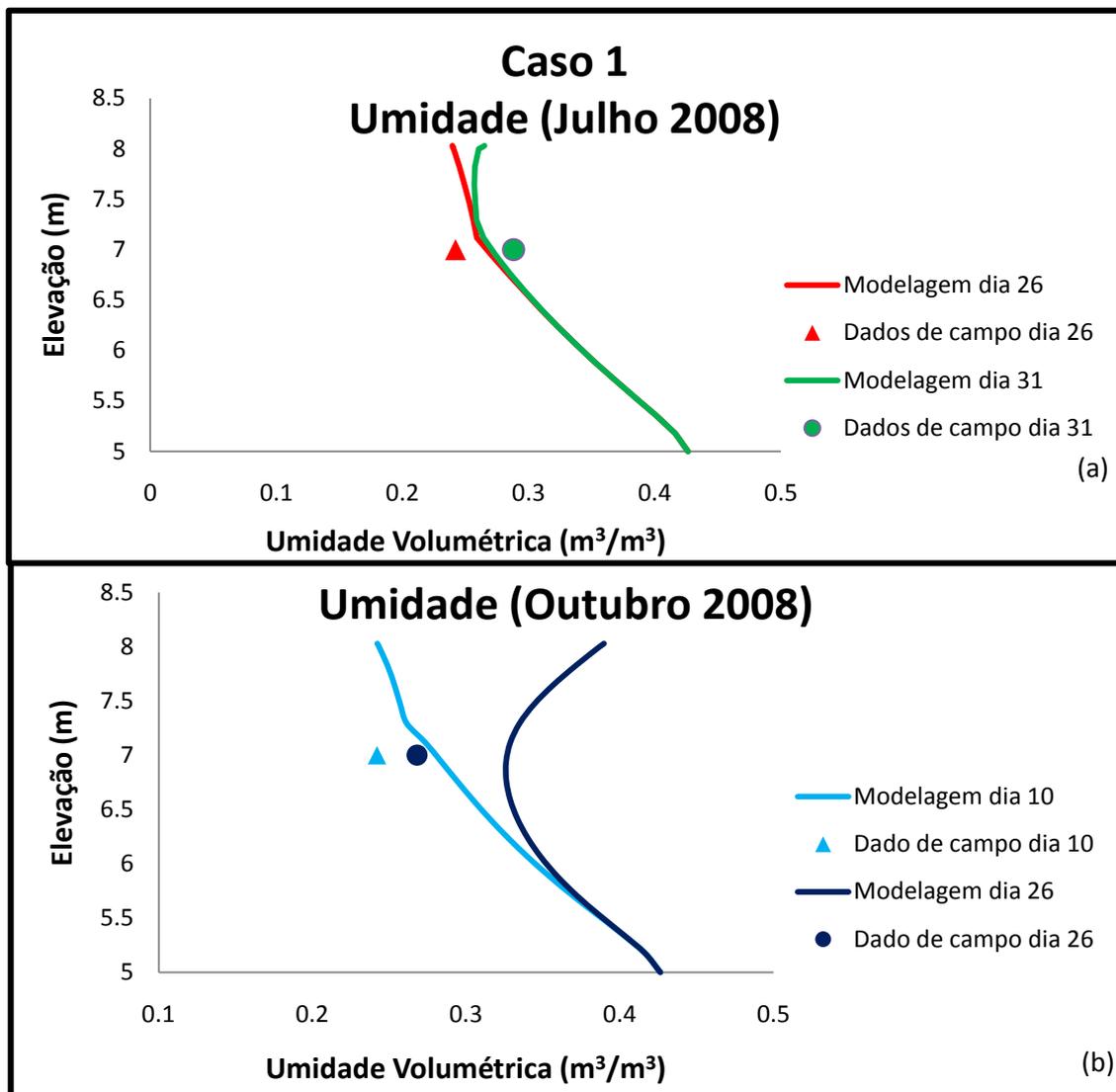


Figura 6.16: Comparação dos resultados de teor de umidade para o caso 1. (a) Umidade do mês de Julho e (b) Umidade do mês de Outubro.

## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Comparando os resultados da modelagem com os obtidos na estação experimental percebe-se que o teor de umidade no mês com menor precipitação e por isso mais seco, os valores medidos pelo sensor de umidade da estação apresentaram pouca diferença (variação de 0,01 a 0,03) dos valores obtidos pela modelagem para a mesma elevação do sensor. No mês de Outubro percebe-se que no dia com elevada precipitação (26) o resultado de campo apresentou uma variação de 0,06 para a modelagem.

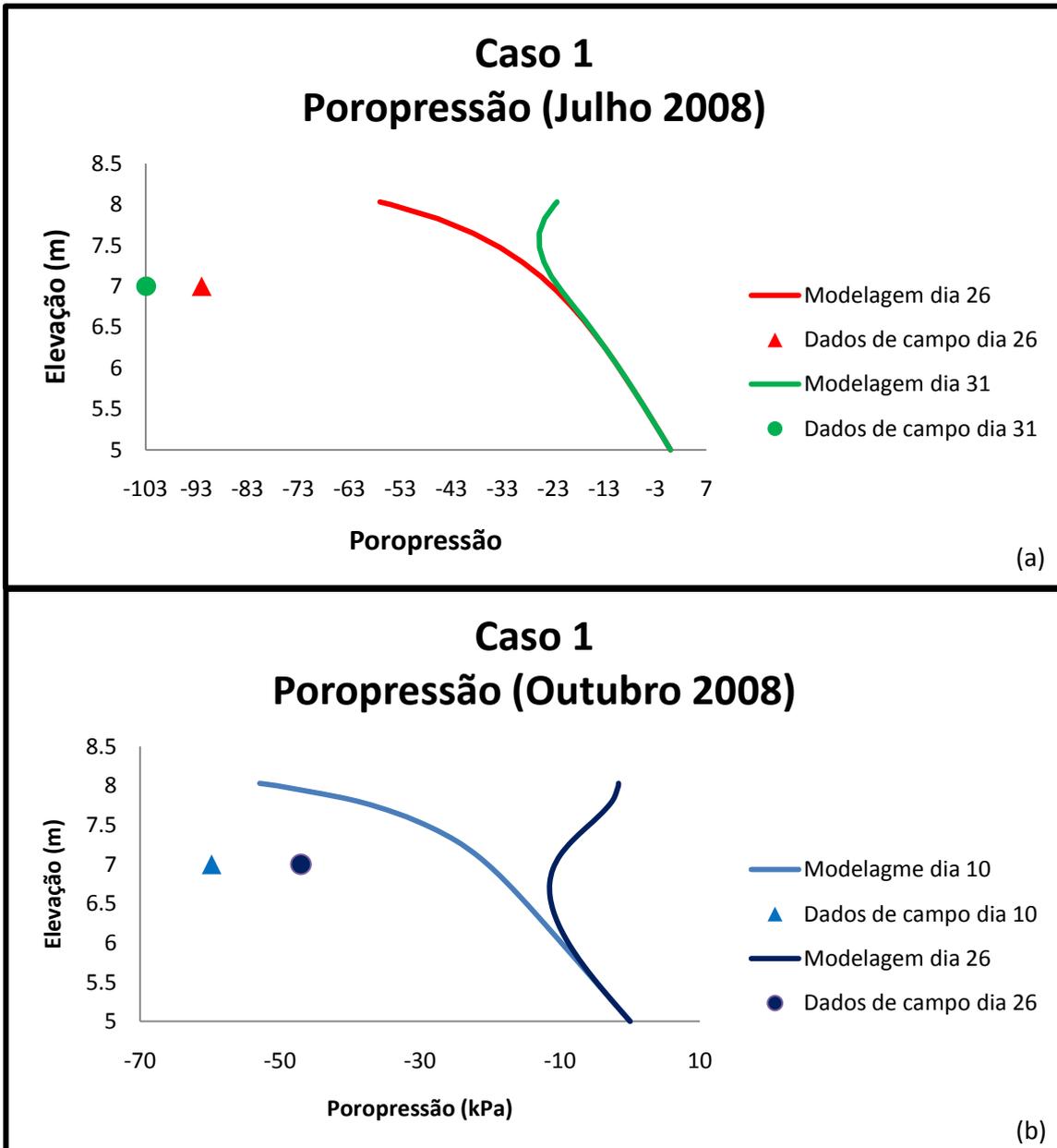


Figura 6.17: Comparação dos resultados de poropressão para o caso 1. (a) Poropressões do mês de Julho e (b) Poropressões do mês de Outubro.

## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A mesma correlação com pouca diferença entre os valores não foi notada comparando os valores obtidos pela modelagem do perfil de poropressão com os resultados dos dados experimentais de campo, conforme apresenta a figura 6.17. No entanto, é necessário ressaltar que o sensor de sucção no rejeito apresentou um erro de leitura conforme mencionado no capítulo anterior.

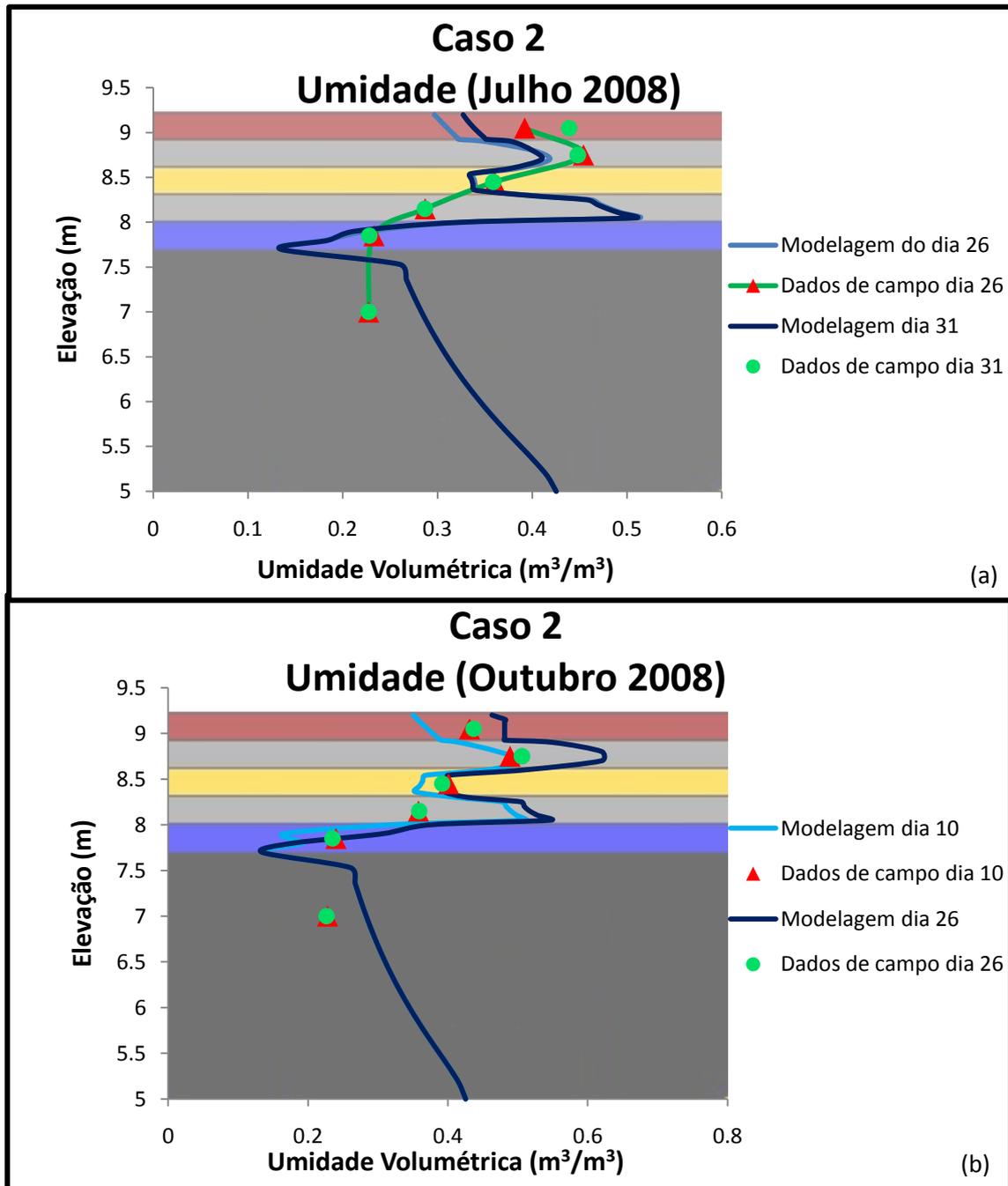


Figura 6.18: Comparação dos resultados de teor de umidade para o caso 2. (a) Umidade do mês de Julho e (b) Umidade do mês de Outubro.

## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Ao se comparar os teores de umidade, ressalta-se que a aproximação é maior nos valores da camada de argila tanto nos dias secos quanto nos dias com elevada precipitação, evidenciando a saturação desta camada argilosa em diferentes condições climáticas.

A boa correlação pode ser observada também nos resultados de umidade do rejeito grosso para as diferentes situações climáticas, demonstrando o desempenho do sistema de cobertura na minimização da infiltração de água no rejeito e assim, na diminuição da geração da drenagem ácida.

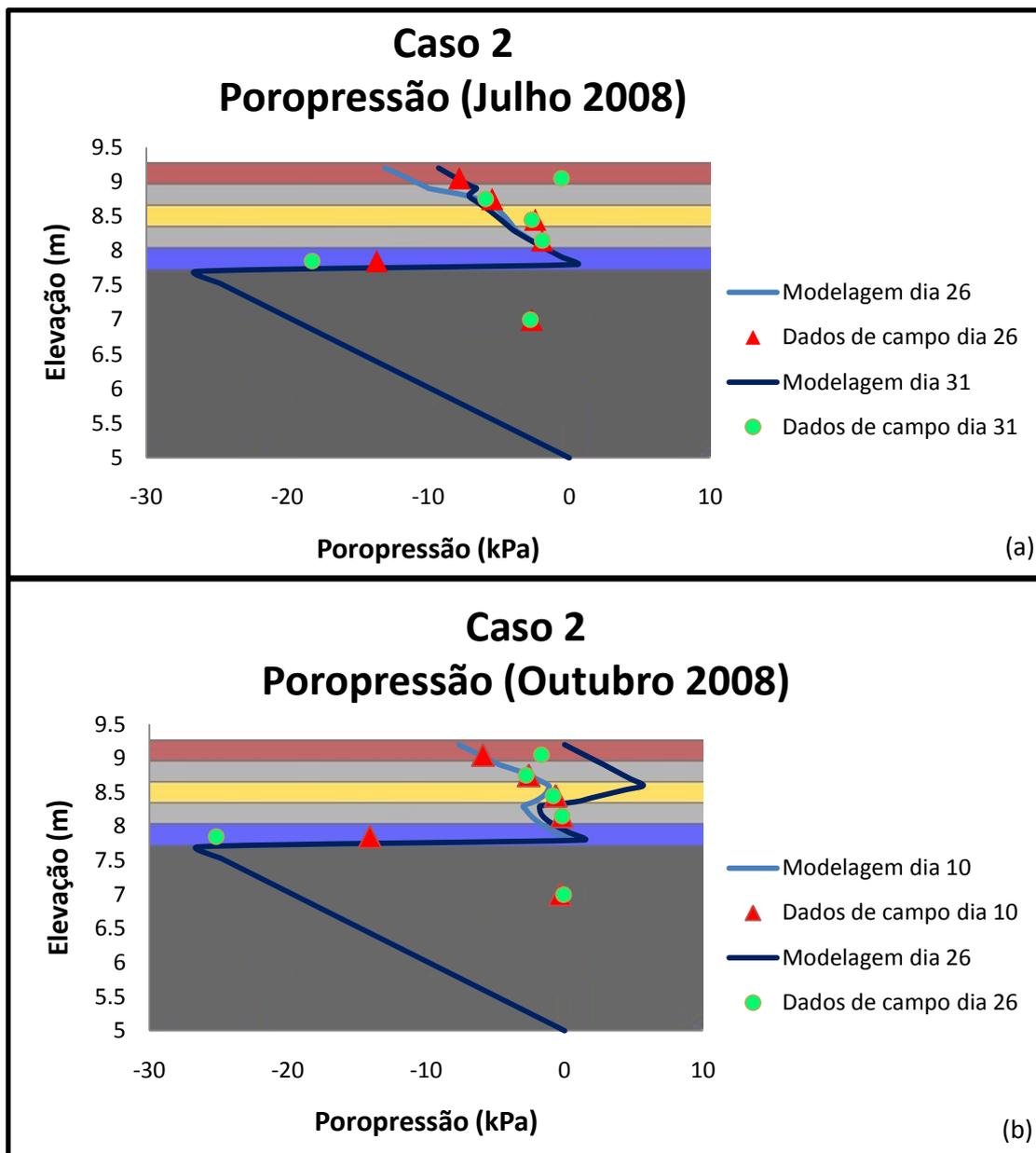


Figura 6.19: Comparação dos resultados de Poropressão para o caso 2. (a) Poropressões do mês de Julho e (b) Poropressões do mês de Outubro.

## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Analisando os valores de poropressão no caso 2, observa-se uma boa correlação entre os resultados da modelagem e dos experimentais de campo nas camadas de cobertura, principalmente nas camadas da barreira capilar (cinzas e argila), tanto para dias secos quanto para os dias úmidos. Uma boa correlação, no entanto, não foi observada na camada de rejeito grosso, podendo ser explicado pelo erro de leitura dos sensores de sucção nesses pontos.

### 6.4 – Considerações finais

Com a utilização de um programa computacional para a modelagem do fluxo de água e balanço hídrico de sistemas rejeito-cobertura foi possível observar de forma simples a redução de água percolada para dentro do rejeito através de um sistema de cobertura do tipo barreira capilar dupla que há em campo na estação experimental.

A simulação numérica demonstrou o bom comportamento da camada de argila em diferentes condições climáticas, mantendo o grau de saturação elevado (acima de 84%), formando uma barreira eficaz a entrada de oxigênio para o interior da célula (rejeito).

Foi possível observar que a barreira capilar dupla desempenhou de forma satisfatória a sua finalidade de configurar-se uma barreira hidráulica e uma barreira ao transporte de oxigênio, mitigando os efeitos da drenagem ácida de minas.

Ao se analisar os percentuais dos dados de volume percolado em campo para os meses estudados houve uma redução de 95,74% do volume percolado no mês de Julho entre a célula com rejeito sem cobertura e a célula com cobertura tipo barreira capilar dupla. No mês de Outubro, a redução observada foi de 84,27% para os casos supracitados.

De acordo com a simulação numérica, as reduções mais significativas foram para o mês com elevada precipitação (Outubro), onde se observou uma redução de 80% para os volumes percolados. Apresentando, desta forma, uma boa correlação entre os resultados experimentais de campo e a modelagem. No entanto, o balanço hídrico do caso 1 no mês de Julho apresentou uma redução de 45% para volumes percolados.

## CAPÍTULO 6: SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Ressalta-se que os dados de campo referem-se ao volume percolado no lisímetro e na modelagem somente considera um metro linear de uma seção transversal que passa no centro da célula

A simulação de um modelo de rejeito sem cobertura foi de suma importância para se evidenciar a eficiência de um sistema de cobertura do tipo barreira capilar dupla, uma vez que sem este sistema o rejeito fica exposto à passagem de água e oxigênio gerando cada vez mais acidez no meio ambiente.

As modelagens apresentadas apresentam resultados satisfatórios quanto ao desempenho do sistema de barreira capilar dupla. Estes resultados se tornam mais promissores à medida que comparados aos dados experimentais de campo, apresentam um comportamento aproximado, demonstrando que a eficiência deste tipo de barreira é real.

A comparação entre aos perfis gerados com modelagem e os pontos dos dados experimentais de campo foram importantes, no entanto, é necessário no futuro, haver mais pontos de medições nas camadas, principalmente no rejeito grosso, a fim de se ter uma maior representatividade ao longo do perfil dos dados de umidade e sucção.

# CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

## 7.1 – Considerações finais sobre o estudo realizado

A cerca dos objetivos propostos e com base nos resultados é possível afirmar que:

- ✓ O sistema de cobertura seca do tipo barreira capilar dupla apresentou um bom desempenho, pois conseguiu inibir a passagem de oxigênio, pois a saturação da camada argilosa, no período seco e úmido, se manteve acima de 84%, como observado nos dados experimentais de campo e na modelagem.
- ✓ O sistema de cobertura do tipo barreira capilar dupla também apresentou bom desempenho com relação à minimização de fluxo de água para dentro do rejeito, identificado em campo e pela modelagem.
- ✓ O método da placa de sucção possibilitou a obtenção dos dados da curva de retenção do rejeito grosso para sucções de até 25 kPa. No entanto, não foi possível com este método determinar o teor de umidade residual e, desta forma, estipulou-se o valor de 1% visto que não se encontrou referência na literatura a cerca deste tipo de material.
- ✓ O monitoramento de campo com os dados experimentais é de grande importância, pois contém as informações necessárias para a compreensão do mecanismo do fluxo no sistema rejeitam/cobertura. No entanto, alguns pontos de medição apresentaram problemas com o sensor de leitura dificultando as análises (principalmente no rejeito grosso).
- ✓ Os sensores que não apresentaram problemas com as leituras corresponderam bem às variações das precipitações dos períodos seco e úmido.
- ✓ Quanto ao desempenho da barreira capilar dupla é importante ressaltar a manutenção do grau de saturação da camada de argila durante o período seco e o período úmido que garantiu condições favoráveis a inibição da passagem de oxigênio para as camadas inferiores abaixo dela minimizando as reações associadas à DAM.
- ✓ A utilização da cinza como material granular em sistemas de cobertura é boa alternativa, pois além da reutilização de um material que existe em grande

## CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

quantidade, a camada de cinza desempenha favoravelmente o seu papel no sistema de barreira capilar dupla de impedir em épocas secas a perda de umidade da camada argilosa por secagem e evaporam e em épocas úmidas funcionar como um dreno.

- ✓ Comparando os resultados obtidos em campo através dos dados de sucção e umidade com os perfis obtidos na modelagem foi possível perceber a boa correlação entre eles, principalmente aos resultados referentes às camadas de cobertura de cinza e argila.
- ✓ A boa correlação entre os resultados dos dados de campo com a simulação numérica garante um melhor entendimento a cerca do desempenho do sistema de cobertura. No entanto, será necessário garantir uma boa resposta dos sensores nas camadas de solo orgânico e rejeito misturado e no rejeito grosso para se afirmar de forma mais precisa a correlação entre eles.
- ✓ A utilização da modelagem numérica com o programa Vadose/W permite extrapolar contornos e gráficos para todo o perfil, diferentes dos dados de campo que se configuram como medições pontuais. Além disso, através do programa é possível obter o balanço hídrico de um sistema rejeito/cobertura em uma determinada escala de tempo e assim caracterizar o fluxo de água em seu interior.
- ✓ Com base na boa correlação entre eles é possível extrapolar os resultados da modelagem numérica em uma escala temporal maior predizendo o desempenho do sistema de forma anual

### 7.2 – Sugestões e propostas para pesquisas futuras

- Novos ensaios com a Placa de Sucção deverão ser realizados, medindo-se sucções menores que 5 kPa.
- Deverão ser realizados ensaios complementares para se compreender a microestrutura do rejeito grosso, como por exemplo, o MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) para observar a distribuição dos poros e o B.E. T

## CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

(Brunauer-Emmett-Teller) para medir a área superficial e a área de microporos do rejeito.

- Utilizar a curva de retenção obtida em campo correlacionando-a com os pontos experimentais de laboratório obtidas no ensaio da Placa de sucção.
- Em campo, os sensores de sucção e umidade deverão ser trocados ou melhorados para não apresentar erros de leitura, é necessário também monitorar de forma constante o desempenho dos sensores para não prejudicar as análises.
- Fazer a modelagem utilizando escala de tempo maior, analisando ao longo no ano o desempenho do sistema rejeito/cobertura Além de modelar outras condições de contorno.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABORRAGE, A.M; LOPES, R.C., 1986, *Projeto Borda Leste da Bacia do Paraná: Integração Geológica e Avaliação Econômica*. Porto Alegre: DMPM/CPRM. V.18.
- ADU-WUSU, C. e YANFUL, E. K., 2006. Performance of engineered test covers on acid-generating waste rock at Whistle Mine, Ontario. *Canadian Geotechnical Journal*, 43, pp. 1-18.
- ALEXANDRE, N.Z., KREBS, A.S.J., 1995, “Qualidade das Águas Superficiais do Município de Criciúma, SC”. In: *Programa de Informações Básicas para Gestão Territorial de Santa Catarina – PROGESC*, v. 1, CPRM, Porto Alegre, RS.
- AUBERTIN M, MBONIMPA M, BUSSIE`RE B., CHAPUIS R.P., 2003, “A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties”. *Canadian Geotechnical Journal*, n. 40, pp 1104–1122.
- BARBOSA, J. P., SOARES, P. S. M., BORMA, L.S., et al., 2001, *Projeto Conceitual para Recuperação Ambiente da Bacia Carbonífera Sul Catarinense*, Vol. I, RT/33/2000 - Relatório Técnico elaborado p/ SIESCEC.
- BARBOUR, S.L., 1990, “Reduction of Acid Generation in Mine Tailings Through the Use of Moisture-Retaining Cover Layers as Oxygen Barriers: Discussion”, *Canadian Geotechnical Journal*, v. 27, pp. 398-401.
- BOHNHOFF, G. L., OGORZALEK, A. S., BENSON, C. H., et al., 2009.”Field Data and Water-Balance Predictions for a Monolithic Cover in a Semiarid Climate”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 3, Mar. 2009, pp. 333-348.
- BORBA, Roberto Ferrari. , 2001, *Carvão Mineral. Balanço Mineral Brasileiro*.  
Disponível em:  
<http://www.dnpm.gov.br/portal/assets/galeriaDocumento/BalancoMineral2001/carvo.pdf>. Acessado em: Março de 2009.
- BORGHETTI SOARES, A.; SOUZA, V. P., 2007, Uso de Coberturas Secas Sobre Rejeitos de Carvão da Região de Santa Catarina. In: *Anais da I Jornada do Programa de Capacitação Institucional*, pp 20-34, CETEM, Rio de Janeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BORGHETTI SOARES, A., UBALDO, M. O., BARBOSA, M. C., et al., 2009, “Design of a Dry Cover Pilot Test for Acid Mine Drainage Abatement in Southern Brazil. I: Materials Characterization and Numerical Modeling”, *Mine Water and the Environment*, v.28 (Jun), pp. 219-231.
- BORMA, L. S. (1998) “Acidificação e liberação de metais pesados em sedimentos de dragagem ricos em sulfetos de Ferro” Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BORMA, L.D.S., MENDONÇA, R. G., SOUZA, V. P., SOARES, P. S., 2003, Utilização De Cinza No Contexto da Reabilitação de Áreas De Mineração de Carvão. Contribuição Técnica In: *V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental* (Mai), Porto Alegre, RS.
- BROOKS, R.H., COREY, A.T., 1964. *Hydraulic Properties of Porous Media*. Colorado State University Hydrology Paper, n. 3, 27 p.
- BUSSIÈRE, B., AUBERTIN, M., AACHIB, et al., 1995. “Unsaturated Flow Modelling of covers for reactive tailings”. In: CAMI’ Proceedings of *Third Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry*, Montréal, Canada, pp. 853-862.
- CARDOSO JR., C.R; FUTAI, M.M., 2005, Simulação do efeito de um fluxo transiente na estabilidade dos taludes. In: *IV Conferencia Brasileira sobre Estabilidade de Enconstas- IV COBRAE*. Volume I. Salvador – BA.
- CARDOSO JÚNIOR, C. R., 2006, *Estudo do comportamento de um solo residual de gnaiss não saturado para avaliar a influência da infiltração na estabilidade de taludes*. Dissertação de M. Sc., USP, São Paulo, SP.
- CARUSO Jr., F. *Mapa Geológico da Região Sul de Santa Catarina*. [Itajaí]: UNIVALLI / OSNLER / CECO / UFRJ. Mapa color. 90 x 90 cm. Escala 1:100.000, 1997.
- CHRISTOPH WELS, S.L; NEWMAN, G., 2001. “Modelling of Alternative Cover Scenarios for Mine Rock Piles at the Zortman and Landusky Mine Sites”. In:

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- National Association of Abandoned Mine Lands Annual Conference*, Aug 19-22, Alberta, Ohio, USA.
- COELHO, H. M. G.; SIMÕES, G. F.; LANGE, L. C., 2007, “Modelo para Avaliação do Balanço Hídrico em Células de Resíduos Sólidos Urbanos, considerando Camadas de Cobertura Intermediárias e Finais” In: *24o. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Anais. Belo Horizonte, MG, Brasil, pp.1-9.
- CONAMA, RESOLUÇÃO N° 20. Classificação de águas segundo seus usos preponderantes e as normas de lançamento de efluentes líquidos. 1986. Brasil
- EPA – Environmental Protection Agency, (1994), Technical Document – *Acid Mine Drainage Prediction*. EPA 530-R04-036, EPA, Washington, D.C., 52p.
- FARIAS, C. E. G., 2002, *Mineração e meio ambiente*. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Disponível em <http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo011-02.pdf>. Acesso em Março de 2009.
- FAGUNDES, J. R. T., 2005, *Balanço hídrico do bota-fora BF4 da mina de Urânio Osamu Utsumi, como subsídio para projetos de remediação de drenagem ácida*. Dissertação de M.Sc., PPGEC / UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil. 147p.
- FEUERHAMEL, C., 2007, *Estudo da resistência ao cisalhamento e da condutividade hidráulica de solos coluvionares não saturados da Formação Serra Geral*. Tese de D. Sc., PPGEC / UFRGS. Porto Alegre. RS, Brasil.
- FREDLUND, D. G., RAHARDJO, H., 1993, “Soil mechanics for unsaturated soils”, *John Wiley & Sons*, New York, 517 p.
- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. D., 1977, Stress state variable for unsaturated soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, v. 103 (GT5), n. 3p. 447 – 466.
- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. (1976), “Constitutive relations for volume change in unsaturated soils”. *Canadian Geotechnical Journal*., n. 13, pp. 261 -276.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FREDLUND, D.G., XING, A., 1994, "Equations for Soil-Water Characteristic Curve", *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31, n. 3, pp. 521-532.
- FREDLUND, D.G., XING, A., HUANG, S., 1994, "Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils Using the Soil-Water Characteristic Curve", *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31, p. 533-546.
- GEOANALYSIS, 2000. SoilCover Software s. Univ of Saskatchewan, Saskatoon.
- GEOSLOPE INTERNACIONAL Ltd, 2008, Vadose/ W 2007. Vadose zone and soil cover analysis.
- GUEVARA, Lílian Rocio Zegarra. 2006, *Predição do potencial de drenagem ácida de minas utilizando o método cinético da coluna de lixiviação*. Dissertação de M.Sc., PPEM / PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
- KÖPPEN, Wilhelm. **Climatologia**. México: Fondo de Cultura, 1948.
- LEE, H.C., WRAY, W.K., 1995, "Techniques to evaluate soil suction – A vital unsaturated soil water variable". *Unsaturated Soils*, Vol. 2, pp. 615 - 622.
- LEONG, E. C.; RAHARDJO, H. (1997), "Review of soil -water charact. curve Eq.". *J. Geot. and Geoenv. Eng.*, dez., pp1106-1117.
- LEONI, G.L.M., 2001, *Análise de Sistemas de Cobertura de Bacias de Rejeitos de Beneficiamento de Urânio*. Dissertação de MSc., COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- LISBOA, R.L.L., 2006, *Determinação da condutividade não saturada de solos residuais com permeâmetro Guelph e ensaios de laboratório*, UFV, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.
- MAIA, A. D., 2004, *Avaliação da Geração de Drenagem Ácida em um Solo Fabricado em Laboratório Contendo Sulfeto de Ferro e Matéria Orgânica*. Dissertação M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MAQSOU, A. BUSSIÈRE, B. MBONIMPA, et al., 2005, “Suction break to control slope-induced moisture variation in layered covers”. 58<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference and 6<sup>th</sup> joint CGS-IAH Conference, Sept. 19-21, Saskatoon, Canada, Session 8A, paper 614.
- MARINHO, F. A. M., 1997, “Medição de sucção em solos” In: *III Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados*, Rio de Janeiro, RJ, Vol. 2, pp373-397.
- MARINHO, F.A.M., 1994, “Medição de Sucção com o Método do Papel Filtro”. In: *X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, Vol. 2, pp. 515–522
- MARTIN, L., SUGIUO, K., FLEXOR, J. M., AZEVEDO, A.E.G, 1988, *Mapa Geológico do Quaternário Costeiro dos Estados do Paraná e Santa Catarina*. Brasília: DNPM. (Série Geológica, 28; Seção Geologia Básica), n. 28, 40 p.
- MATEUS, M.S.C.S., 2008. *Proposta de Modelo para Avaliação do Balanço Hídrico de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso do Aterro Metropolitano Centro de Salvador-BA*. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,RJ, Brasil.
- MENDONÇA, R. G. (2007). *Estudo da Difusão do Oxigênio em Materiais de Cobertura*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MENDONÇA, R. G., BORMA, L.S. & SOARES, P.S.M., 2003, “Caracterização do Potencial de Geração de Acidez de Resíduos de Mineração de Carvão” In: *V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental*, Porto Alegre, RS.
- MIGUEL, M. G., TEIXEIRA, R. S., PADILHA, A. C. C., 2006, Curvas Características de Sucção do Solo Laterítico da Região de Londrina/PR. *Revista de Ciência & Tecnologia*, v. 12, n. 24, pp. 63-74.
- MITSUBISHI MATERIALS CORP., CHIYODA-DAMES & MOORE CO., 1997, *Interim Report for the Feasibility Study on Recuperation of Mined-out Areas in the South Region of Santa Catarina in the Federative Republic of Brazil*, JICA, Japão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MUKUNDANE, Michel, 2010. “*Modeling of predicted performance of the desulphurized tailings cover at the detour lake mine*”. M.Sc. dissertation, University Of British Columbia, Vancouver, Canada.
- NICHOLSON, R.V., GILLHAM, R.W., CHERRY, J.A., REARDON, E.J., 1989, “Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers”, *Canadian Geotechnical Journal*, v. 26, n.2, pp. 1-8.
- O’KANE, M, 1996, “*Instrumentation and Monitoring of an Engineered Soil Cover System for Acid Generating Mine Waste*”. M.Sc. dissertation, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
- O’KANE, M.; AYRES, B.; CHRISTENSEN, D; *et. al.*, 2002, “Manual on Cover System Design for Reactive Mine Waste”. In: *CANMET-CETEM*, Report No. 689-01.
- OKEREKE, Amechi, STEVENS, Edward Jr., 1991, “Kinetics of Iron Oxidation by *Thiobacillus ferrooxidans*”. *Applied and Environmental Microbiology Microbiol.* April v 57, n. 4, pp. 1052-1056.
- OLIVEIRA, O. M. de, 2004, *Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado*. Tese de D.Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil.
- PIET, S. J., JACOBSON, J. J., MARTIAN, P., *et al.*, 2003. “Modeling and Simulation of Long-Term Performance of Near-Surface Barriers”. In: Conference: Waste Management 2003 Symposium, Feb 23-27, Tucson, Arizona, United States.
- REICHARDT, Klaus, 1985, *Processos de Transferência no Sistema Solo-Planta-Atmosfera*, 4<sup>a</sup> ed. Campinas: Fundação Cargill. 466p.
- REICHARDT, Klaus, 1990. *A água em sistemas agrícolas*. São Paulo: Editora Manole Ltda, 188 p..
- SCANLON, B. R., CHRISTMAN, M., REEDY, R. C., *et al.*, 2002, Intercode comparisons for simulating water balance of surficial sediments in semiarid regions: *Water Resources Research*, v. 38, p. 1323–1339.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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, Nov.
- SILVA, C. C. M. da, 2008, *Avaliação de Dispositivos de Drenagem a Meia Encosta em Estradas Rurais*, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SINGER, P. C., STUMM, W., 1970, Acidic Mine Drainage: The Rate-Determining Step. *Science*, v 167, 3921, pp.1121–1123.
- SKOUSEN, J.G., 2000, “Static Tests for Predicting Coal Mine Drainage”. In: *Acid mine drainage prediction in the eastern United States*. Acid Drainage Technology Initiative (ADTI) Technical Report. *National Mining Association and National Mine Land Reclamation Center*, Morgantown, WV. pp. 73–98.
- SOBRINHO, N. L. C., 2000. Uma análise do balanço hídrico do aterro sanitário de Presidente Prudente. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa. 117p.
- SOUZA, V. P. de, 1995, *Drenagem ácida de estéreis piritosos da mina de urânio de Poços de Caldas: Interpretação e Implicações Ambientais*. Dissertação de M.Sc., D.E.M. / USP, São Paulo, SP, Brasil.
- 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.
- SOUZA, V. P. de, POSSA, M. V., SOARES P. S. M., *et al.*, 2009,. Desempenho de Cobertura Seca em Escala Piloto para Abatimento de DAM Gerada por Rejeito de Carvão In: XIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, pp. , Gramado, RS, Set/ Out.
- SWANSON, A.D., 1995, *Predictive modelling of moisture movement in engineered soil covers for acid generating mine waste*. MSc. dissertation, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- TEIXEIRA, P. F., 2002, *Investigação sobre as características geotécnicas de um resíduo de papel*. Dissertação de M.Sc., USP, São Paulo, SP.
- THOMPSON, S.J., ARMSTRONG, C.F., 1987, “Calibration of the Watermark Model 200 Soil matric potential Sensor”, *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 3, No. 2, pp. 186-189.
- UBALDO, M.O., BARBOSA, M.C., BORMA, L.S., 2006, “Technical and environmental viability study of the use of coal ash as covering material for mining rejects”. In: *Proceedings of 5th international congress on environmental geotechnics (5ICEG)*, Cardiff, Wales, UK, vol 2. AA Balkema, Rotterdam, pp. 1593–1600.
- UBALDO, M. O., 2005, *Uso de Cinza de Carvão na Composição de uma Cobertura de Rejeitos de Mineração*, Dissertação M.Sc., COPPE/UFRJ, RJ.
- UBALDO, M. O. ; BORMA, L. S.; BARBOSA, M. C., 2006, “Gestão de resíduos sólidos geradores de drenagem ácida de minas com o uso de coberturas secas”. *Série Gestão e Planejamento Ambiental*, CETEM / MCT, v. 04 (Nov), p. 5 - 34.
- UBALDO, M. O., BORGHETTI SOARES, A., SOUZA, V.P. *et al.*, 2008, “Effectiveness evaluation of a dry cover system for abatement of acid mine drainage from waste pyritic coal waste”. In: *8<sup>th</sup> International conference of Clean Technologies for the World Mining Industry*, Santiago, Chile, April.
- VAN GENUCHTEN, M.T., 1980, “A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils”, *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, pp. 892-898.
- VAN GENUCHTEN, M.Th., LEIJ, F.J., YATES, S.R., 1991, *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. USEPA 000/091/000. USEPA, Ada, OK..
- VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; PUFAHL, D.E., 1999, “The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristic of a compacted till”. *Géotechnique*, v.49 n.2 (abr), pp. 143-159.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- YANFUL, E.K., 1993. "Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic mine tailings". *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 119: 1207–1228.
- YANFUL, E.K., WOYSHNER, M.R. and AUBÉ, B.C., 1993-a. "Field Evaluation of the Effectiveness of Engineered Soil Covers for Reactive Tailings". Canada Centre for Mineral and Energy Technology, CANMET Contract Report.
- YANFUL, E.K., RILEY, M.D., WOYSHNER, M.R. *et al.*, 1993-b, "Construction and Monitoring of a Composite Soil Cover on an Experimental Waste-Rock Pile Near Newcastle, New Brunswick, Canada", *Canadian Geotechnical Journal*, v. 30, pp. 588-599.
- WILSON, G.W., 1990. Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems. Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- WILSON, G.W., FREDLUND, D.G., AND BARBOUR, S.L., 1994. Coupled soil atmosphere modeling for soil evaporation. *Canadian Geotechnical Journal*, 31: 151-161.
- WOYSHNER, M.R., e Yanful, E.K., 1995, "Modelling and field measurements of water percolation through an experimental soil cover on mine tailings". *Canadian Geotechnical Journal*, v. 32, pp. 601 – 609.
- WROTH, C.P. e HOULSBY, G.T. , 1985, "The Variation of the Shear Modulus of a Clay with Pressure and Overconsolidation Ratio", OUEL Report No. 1591/85, (Soil Mechanics Report No. SM058/85), Department of Engineering Science, University of Oxford.
- ZAHN, G., SCHAFER, W., MILCZAREK, M., *et al.*, 2006. "The Evolution Of Evapotranspiration Cover Systems At Barrick Goldstrike Mines". In: 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), March 26-30, St. Louis MO, United State.

## ENSAIO DA PLACA DE SUCCÃO

$P_{\text{água}}$  → Ensaio realizado sem amostra de resíduo, sem água (seco) e saturação de todo o sistema (saturado).

$M_0$  → Massa do sistema base + anel + pedra + tampa + mangueira na condição inicial ( $\Delta h_w = 0$ ) (g).

$M_i$  → Massa do sistema após elevação da base no estágio  $i$  ( $\Delta h_{wi}$ ) (g).

Para o ensaio de calibração, teoricamente,  $M_i = M_0 = \text{constante}$ , nas duas situações: seca e saturada.

Para o ensaio seco:

$M_i = M_0$ ; porque a pressão é sempre atmosférica.

Para ensaio saturado:

$M_i = M_0$ ; porque a pedra porosa tem alta pressão de entrada de ar e não dessatura.

Então as diferenças de peso observado nos dois ensaios de calibração entre cada dois estágios sucessivos representam o alívio de peso por parte da mangueira que foi elevada, seca no ensaio com sistema sem água, e mangueira + água no ensaio com o sistema saturado.

$\Delta \varepsilon_i = M_i - M_{i-1}$  → diferença de peso da mangueira entre dois estágios sucessivos (g)

<b>Ensaio Placa de Sucção - Teste (Calibração)</b>							
<b>Estágio</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Ensaio com o sistema seco</b>			<b>Ensaio com o sistema saturado</b>		
		Dia	$M_{\text{sistema}}$ (g)	$\Delta \varepsilon_i$ (g)	Dia	$M_{\text{sistema}}$ (g)	$\Delta \varepsilon_i$ (g)
<b>0</b>	<b>0</b>	24/02/2010	1616,83	-	26/02/2010	1784,53	-
<b>1</b>	<b>0,5</b>	24/02/2010	1631,53	14,7	26/02/2010	1810,26	25,73
<b>2</b>	<b>1</b>	24/02/2010	1640,81	9,28	26/02/2010	1829,03	18,77
<b>3</b>	<b>1,5</b>	24/02/2010	1652,30	11,49	02/03/2010	1849,66	20,63
<b>4</b>	<b>2</b>	24/02/2010	1662,29	9,99	02/03/2010	1880,44	30,78
<b>5</b>	<b>2,5</b>	24/02/2010	1670,63	8,34	04/03/2010	1904,85	24,41

Para corrigir o peso em relação ao erro devido à elevação da mangueira:

$M_i$  → peso medido no estágio (g)

$M_{i-1}$  → peso medido no estágio anterior (g)

$\Delta\varepsilon_i$  → acréscimo de peso devido à elevação da mangueira no estágio (i) em relação ao estágio (i-1)

Então:

$$(\Delta M_w)_i = (M_{conj.})_i - (M_{i-1})$$

### - Cálculos:

- **Volume total (Vt) = Volume do anel (V<sub>anel</sub>):**

$$V_t = V_v + V_{rej}$$

- **Volume do rejeito (V<sub>rej</sub>):**

$$V_{rej} = \frac{M_{rej}}{\gamma_{srejeito}}; \text{ onde}$$

$M_{rej}$  = massa seca do rejeito medido pela balança

$$\gamma_{srejeito} = \frac{G_s}{\gamma_a} \rightarrow \gamma_a = 1 \text{ g/cm}^3, \text{ assim}$$

$$V_{rej} = \frac{M_{rej}}{G_s}$$

- **Volume de vazios (V<sub>v</sub>):**

$$V_v = V_{anel} - V_{rej}$$

- **Índice de vazios (e):**

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

- **Porosidade (n):**

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

Se o rejeito estiver submerso, como durante o estágio 0,  $V_v = V_w$ . Porém deve-se calcular o peso de água considerando o empuxo, logo:

- **Peso específico submerso ( $\gamma'_{sat}$ ) (HEAD, 1980) :**

$$\gamma'_{sat} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w$$

- **Massa de água ( $M_a$ )**

$$\gamma'_{sat} = \gamma_t - \gamma_w, \text{ logo:}$$

$$\frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w = \frac{M_a + M_{rej}}{V_t} - \gamma_w$$

$$\frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w \cdot V_t = M_a + M_{rej} - \gamma_w \cdot V_t$$

$$M_a = \left( \frac{G_s - 1}{1 + e} \right) \gamma_w \cdot V_t + \gamma_w \cdot V_t - M_{rej}$$

$$M_a = \left[ \frac{G_s - 1}{1 + e} + 1 \right] \gamma_w \cdot V_t - M_{rej}$$

$$M_a = \left[ \frac{G_s - 1}{1 + e} + 1 \right] V_t - M_{rej}$$

- **Umidade gravimétrica ( $\omega$ ):**

$$\omega = \frac{P_w}{P_s}$$

- **Umidade volumétrica ( $\theta$ ):**

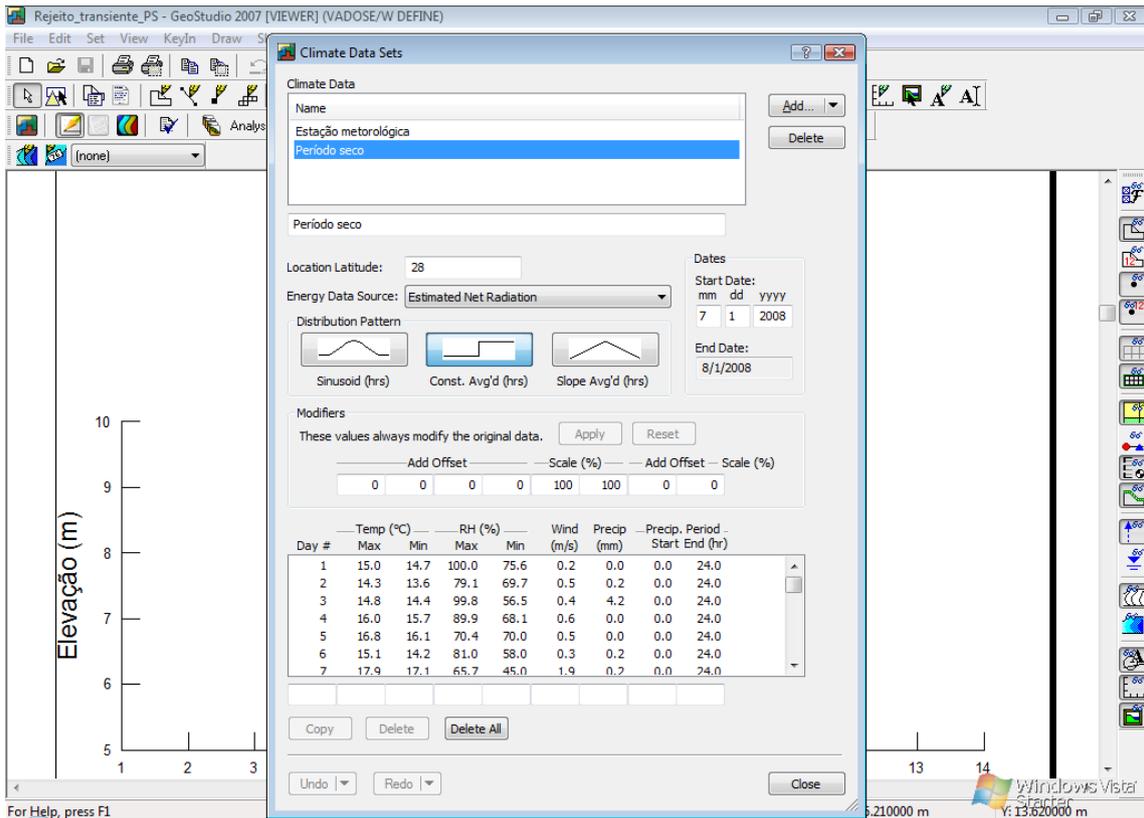
$$\theta = \omega \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_w}$$

- **Grau de saturação (S):**

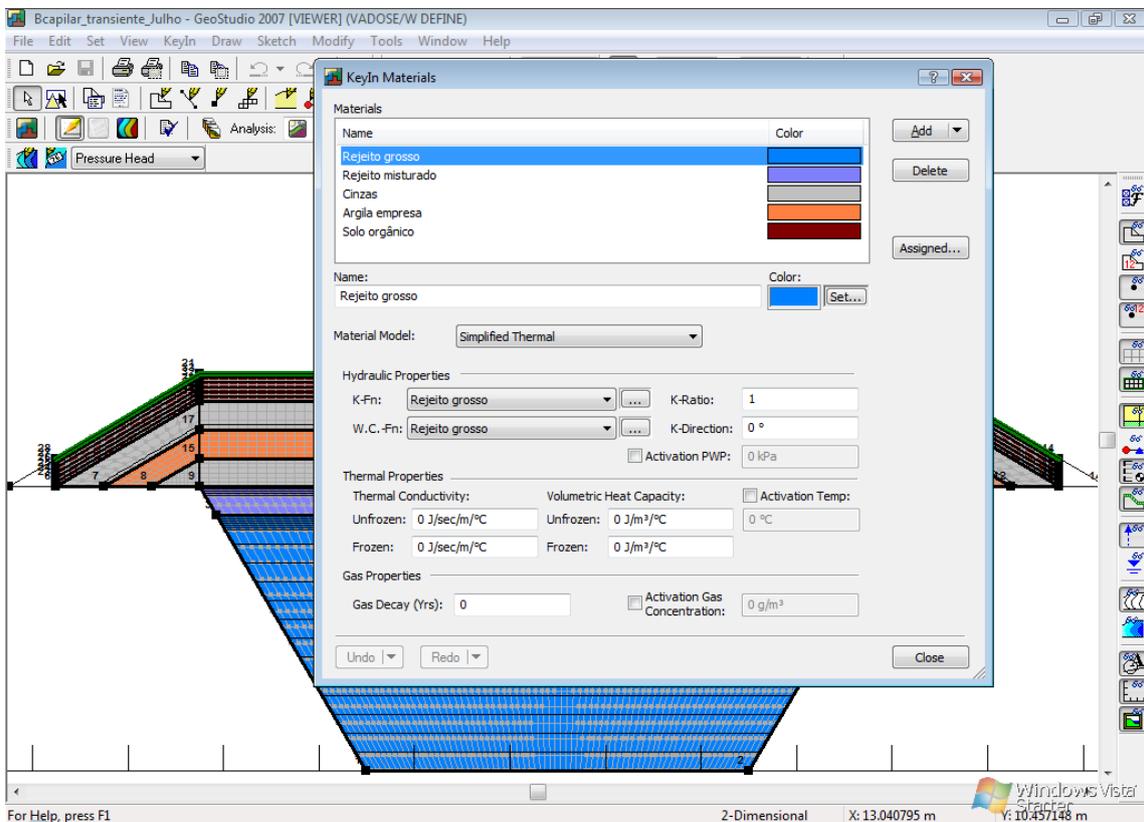
$$S = \left( \frac{G_s}{e} \right) \cdot \omega$$

## ENSAIO PLACA DE SUCCÃO

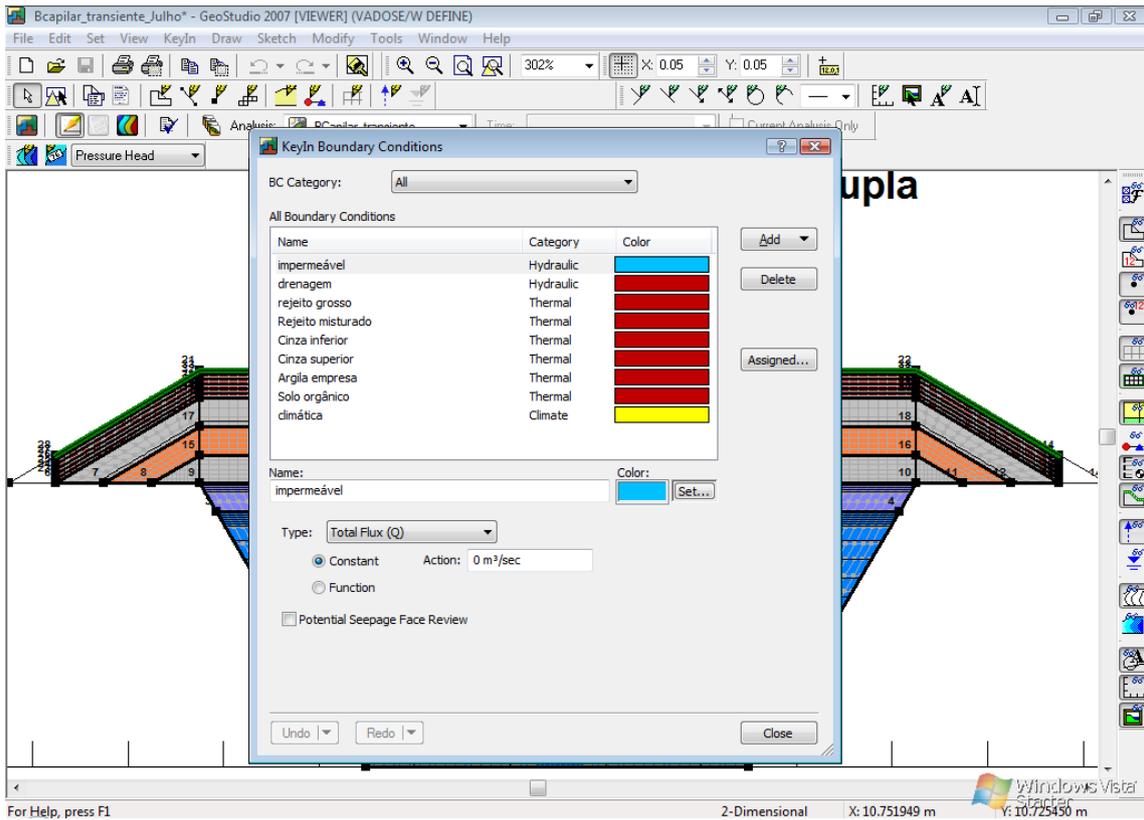
	Estágio	Altura (m)	Dia	$M_i$ (g)	$\Delta\varepsilon_i$ (g)	$M_i$ (corrigido)	$M_{rej}$ (g)	$M_a$ (g)	$\omega$ (%)	$\theta$ (%)	S (%)
<b>Ensaio 1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	16/03/2010	2703,28	-	2703,28	750,03	287,69	38,36	50,43	100,22
	<b>1</b>	<b>0,5</b>	17/03/2010	2483,08	25,73	2457,35	750,03	41,76	27,93	36,71	72,97
	<b>2</b>	<b>1</b>	18/03/2010	2500,64	18,77	2481,87	750,03	40,55	27,76	36,50	72,55
	<b>3</b>	<b>1,5</b>	18/03/2010	2517,41	20,63	2496,78	750,03	36,69	27,25	35,83	71,20
	<b>4</b>	<b>2</b>	19/03/2010	2535,45	30,78	2504,67	750,03	23,95	25,55	33,59	66,77
	<b>5</b>	<b>2,5</b>	21/03/2010	2550,47	24,41	2526,06	750,03	14,56	24,30	31,95	63,49
<b>Ensaio 2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	4/04/2010	2685.56	-	2685.56	709,08	302,49	42,66	53,02	100,00
	<b>1</b>	<b>0,5</b>	15/04/2010	2460.21	25,73	2458,3	709,08	51,41	30,90	38,41	72,44
	<b>2</b>	<b>1</b>	16/04/2010	2470.07	18,77	2475,67	709,08	49,50	30,63	38,07	71,80
	<b>3</b>	<b>1,5</b>	17/04/2010	2496.31	20,63	2482,22	709,08	48,10	30,43	37,83	71,34
	<b>4</b>	<b>2</b>	18/04/2010	2513	30,78	2505,64	709,08	34,02	28,45	35,36	66,69
	<b>5</b>	<b>2,5</b>	19/04/2010	2530.05	24,41	2458,3	709,08	26,66	27,41	34,07	64,25
<b>Ensaio 3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	29/04/2010	2699.25	-	2699.25	710.53	301,94	42,50	52,93	100,00
	<b>1</b>	<b>0,5</b>	02/05/2010	2498.94	25,73	2724.98	710.53	243,60	34,28	42,70	80,68
	<b>2</b>	<b>1</b>	03/05/2010	2487,04	18,77	2517.71	710.53	212,93	29,97	37,33	70,52
	<b>3</b>	<b>1,5</b>	04/05/2010	2501.44	20,63	2507.67	710.53	206,70	29,09	36,23	68,46
	<b>4</b>	<b>2</b>	05/05/2010	2523.53	30,78	2532.22	710.53	198,01	27,87	34,71	65,58
	<b>5</b>	<b>2,5</b>	06/05/2010	2527.12	24,41	2547.94	710.53	177,19	24,94	31,06	58,68



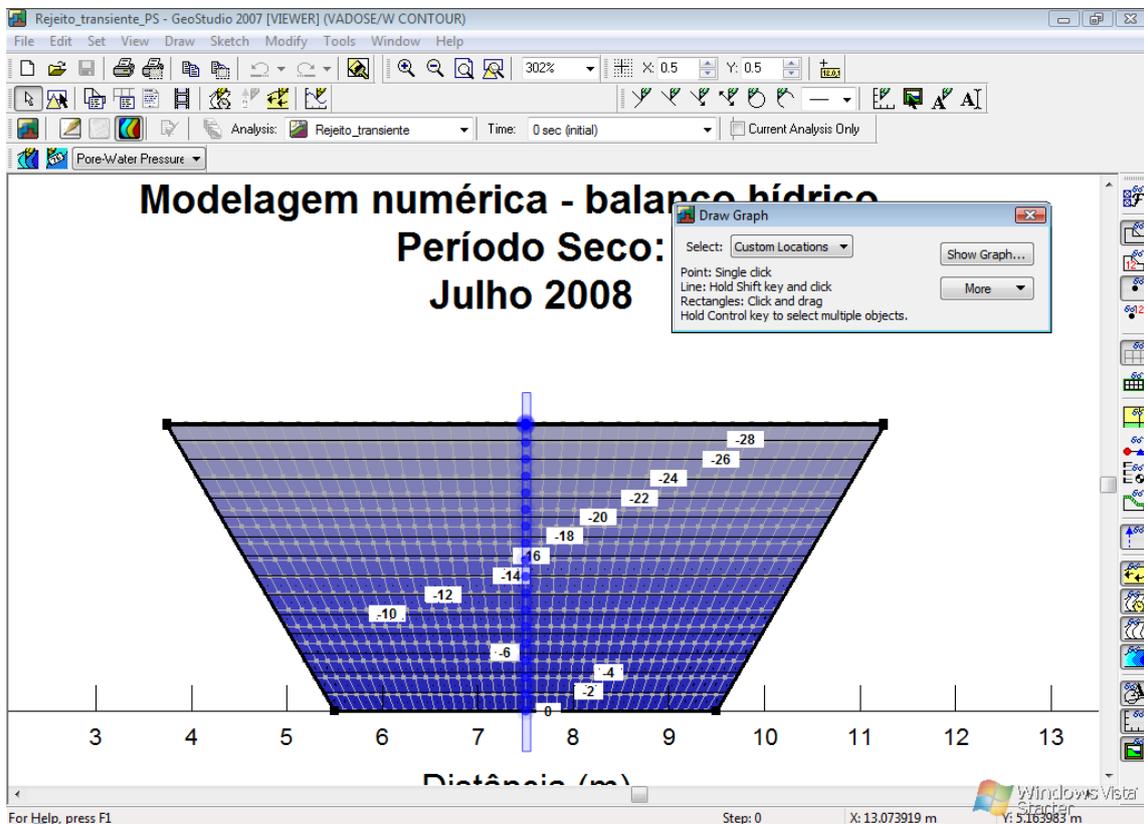
Dados de entrada climáticos



Definição dos materiais



Condições de Contorno



Localização dos pontos de medição de umidade e propressão para o caso 1



Localização dos pontos de medição de umidade e poropressão para o caso 2



Localização do ponto de medição da saturação da camada argilosa

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)