Gilberto Oliveira Joaquim Junior

COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE COBERTURA EM RELAÇÃO À INFILTRAÇÃO DE ÁGUA PLUVIAL NO ATERRO SANITÁRIO DE SEROPÉDICA (RJ), DURANTE A FASE DE OPERAÇÃO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientadoras: Juacyara Carbonelli Campos

Elisabeth Ritter

Rio de Janeiro

2015

CIP - Catalogação na Publicação

62c

JOAQUIM JUNIOR, GILBERTO OLIVEIRA
COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE COBERTURA EM RELAÇÃO À INFILTRAÇÃO DE ÁGUA PLUVIAL NO ATERRO SANITÁRIO DE SEROPÉDICA (RJ), DURANTE A FASE DE OPERAÇÃO / GILBERTO OLIVEIRA JOAQUIM JUNIOR. -- Rio de Janeiro, 2015.
210 f.

Orientadora: Juacyara Carbonelli Campos.
Coorientadora: Elisabeth Ritter.
Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, 2015.

1. Resíduos sólidos. 2. Infiltração de água no solo. 3. Lixiviado de aterro. 4. Barreira capilar. 5. Condutividade hidráulica. I. Carbonelli Campos, Juacyara , orient. II. Ritter, Elisabeth, coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE COBERTURA EM RELAÇÃO À INFILTRAÇÃO DE ÁGUA PLUVIAL NO ATERRO SANITÁRIO DE SEROPÉDICA (RJ), DURANTE A FASE DE OPERAÇÃO

Gilberto Oliveira Joaquim Junior

TESE SUBMETIDA AO PROGRAMA DE TECNOLOGIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS

Examinada por:

Profa. Juacyara Carbonelli Campos, D.Sc
EQ/UFRJ (Orientadora)

Profa. Elisabeth Ritter, D.Sc.
DESMA/UERJ (Orientadora)

Dra. Bianca Ramalho Quintaes, D.Sc.
COMLURB

Profa. Raquel Velloso, D.Sc.
PUC-Rio

Profa. Denise M. S. Gerscovich, D.Sc.

FEN/UERJ

Profa. Eliana Flavia Camporese Sérvulo, D.Sc.
EQ/UFRJ

Profa. Fabiana V. Fonseca, D.Sc.
EQ/UFRJ

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Maria do Carmo, pelo apoio de sempre, em todos os momentos.

À todos os que se dedicam em realizar pesquisas e trazer soluções relacionadas ao problema dos resíduos sólidos urbanos.

Agradecimentos

A Deus, por tudo!

À Profa. Juacyara Carbonelli Campos, pela orientação, apoio, paciência durante looonga jornada. Obrigado por não desistir! Agradeço pelo privilégio da sua orientação, pelas oportunidades de aprendizagem ao longo destes anos de convívio.

À Profa. Elisabeth Ritter, por ter depositado tamanha confiança em minha pessoa. Obrigado não só por acreditar, como estimular a minha capacidade. Obrigado pela orientação. Devo a realização deste trabalho ao seu apoio em todos os sentidos.

À empresa Ciclus (SERB – Saneamento e Energia Renovável do Brasil S/A) pelo apoio para a realização dos experimentos dentro do aterro sanitário de Seropédica.

À equipe do laboratório de Física do Solo do Instituto Agronômico, em especial à Dra. Sonia Carmela Falci Dechen, pelo apoio na realização dos ensaios.

Ao laboratório de Mecânica do Solo da UERJ, pelo apoio na realização de ensaios nas amostras de solos.

Ao pós-doutorando Dr. Getúlio C. Figueredo pelo apoio nos ensaios de campo e de laboratório, além das dicas e auxílio técnico por diversas vezes quando demandado.

À FAPERJ e CNPq pelo apoio financeiro na obtenção de equipamentos e demais necessidades para realização deste trabalho.

À Dra. Renata Borges, por quem tudo começou. Muito obrigado, Renatinha!

Aos colegas acadêmicos que me acompanharam ou auxiliaram durante esta árdua jornada, cada qual no seu objetivo, Marco André, Thyago, Priscila, Douglas.

Ao Inmetro pela liberação, e aos colegas da Dicla/Cgcre que me apoiaram amplamente até o final.

RESUMO

JOAQUIM JUNIOR, Gilberto Oliveira. **Comparação de desempenho de sistemas de cobertura em relação à infiltração de água pluvial no aterro sanitário de Seropédica (RJ), durante a fase de operação.** Rio de Janeiro, 2015. Tese (Doutorado em Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

A geração de lixiviados é um dos principais problemas na operação dos aterros sanitários, uma vez que sua coleta e tratamento representam significantes custos operacionais. Por isso, tem-se empregado o sistema de cobertura dos resíduos, cujo principal objetivo é formar uma barreira, com o propósito de reduzir a infiltração de água de precipitação. Em regiões úmidas, o desempenho destas camadas pode ser reduzido na medida em que ciclos de ressecamento e umedecimento promovem o aparecimento de trincas e rachaduras, comprometendo a sua integridade e funcionalidade. Diante disso, é de crucial relevância avaliar práticas reais relacionadas ao emprego de camadas de cobertura convencionais, além de estudar alternativas potenciais para as condições de pluviosidade elevada presente em várias localidades do território brasileiro. Este trabalho tem como objetivo comparar o desempenho da cobertura alternativa do tipo barreira capilar dupla e da cobertura convencional, em diferentes regimes pluviométricos. A comparação incluiu uma cobertura convencional protegida com grama. Foram realizados monitoramento em campo da umidade, da temperatura, da sucção e da infiltração, ensaios de laboratório, ensaios de campo e simulação numérica com o software Vadose/W. Foi desenvolvida uma metodologia para comparação de desempenho das coberturas através dos resultados obtidos. Por meio desta comparação, concluiu-se que a barreira capilar não proporcionou melhor desempenho em relação à cobertura convencional. Além disso, a inclusão de uma camada de vegetação melhorou significativamente o desempenho da cobertura convencional.

ABSTRACT

JOAQUIM JUNIOR, Gilberto Oliveira. **Comparação de desempenho de sistemas de cobertura em relação à infiltração de água pluvial no aterro sanitário de Seropédica (RJ), durante a fase de operação.** Rio de Janeiro, 2015. Tese (Doutorado em Processos Químicos e Bioquímicos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Leachate generation is one of the main problems in landfill operation, due to expensive costs for leachate treatment. Despite of this problem, cover system has been implemented, in order to act as a barrier, reducing water percolation. In humid sites, the performance of these covers can be reduced by cracking upon desiccation and moistening cycles. Thus, real practices and potential alternatives related to cover systems in Brazil´s humid sites are relevant. The objective of this study was comparing capillary barrier and conventional cover systems performance in different moisture and precipitation conditions. A vegetated protective layer was included in the comparison. In situ monitoring of soil moisture, temperature, soil suction and percolation, laboratory tests, site specific tests and simulations by software Vadose/W were performed. A methodology was developed in order to compare the cover performance by using results obtained. Results indicated that capillary barrier could not promote better performance than conventional cover. In addiction, vegetated protective layer improved the conventional cover performance.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS. 12

1.1 Objetivos Gerais 15

1.2 Objetivos específicos 15

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 16

2.1 Disposição final de resíduos sólidos e geração de lixiviados 16

2.2 Introdução aos sistemas de cobertura em aterros de resíduos 19

2.3 Conceitos de hidráulica relevantes ao desempenho dos sistemas de coberturas 21

2.3.1Propriedades hidráulicas dos solos.... 22

2.3.1.1 Sucção e curva característica da água no solo 23

2.3.2 Fluxo da água através do solo 30

2.3.2.1 Condutividade hidráulica do solo 31

2.3.2.2 Equação de Richards 33

2.4 Desempenho de coberturas em aterros de disposição de resíduos 35

2.4.1 Coberturas convencionais 35

2.4.2. Coberturas alternativas 38

2.4.2.1 Camadas de cobertura monolíticas 39

2.4.2.2 Barreiras capilares 40

2.4.2.3 Coberturas evapotranspirativas 45

2.4.3 Avaliação de desempenho de camadas de cobertura 46

2.4.3.1 Métodos de avaliação de desempenho de coberturas 48

2.4.3.1.1 Método do balanço hídrico 48

2.4.3.1.2 Inferências baseadas no monitoramento da umidade e do potencial do solo 50

2.4.3.1.3 Traçadores 52

2.4.3.1.4. Lisimetria 53

2.4.3.2 Outras abordagens sobre avaliação de desempenho de sistemas de coberturas 54

2.4.3.2.1 Dificuldades de medição da infiltração com lisímetros 54

2.4.3.2.2 Demonstrações de campo 55

2.4.4 Simulação numérica para avaliação de desempenho de coberturas 56

CAPÍTULO 3 MATERIAL E MÉTODOS 58
3.1 Introdução
3.2 Descrição do aterro sanitário CTR Seropédica 60
3.3 Descrição do local de estudo 63
3.3.1 Dados climáticos 63
3.3.1.1 Temperatura 64
3.3.1.2 Precipitação 64
3.3.1.3 Radiação solar, Ventos, Umidade Relativa do Ar 65
3.3.1.4 Evaporação e balanço hídrico 66
3.3.2 Dados do meio físico 66
3.4 Descrição do experimento de campo 67
3.4.1.Configuração experimental e instrumentação da etapa preliminar 70
3.4.2 Configuração experimental e instrumentação da etapa principal 80
3.4.2.1 Cobertura convencional 83
3.4.2.2 Barreira capilar 83
3.4.2.3 Cobertura Convencional Vegetada 84
3.4.2.4 Instalação dos instrumentos 84
3.4.2.5 Célula REF 87
3.4.2.5.1 Instalação dos tensiômetros 88
3.4.2.5.2 Sistema de medição de infiltração da célula REF 89
3.4.3 Configuração experimental e instrumentação da etapa complementar 92
3.5. Ensaios de campo 97
3.5.1 Ensaio de condutividade hidráulica saturada em campo 98
3.5.2 Determinação da massa específica in situ 99
3.6 Ensaios de laboratório 100
3.6.1 Caracterização do solo 100
3.6.2 Determinação de parâmetros hidráulicos 101
3.6.2.1 Determinação da condutividade hidráulica do solo saturado em laboratório 102
3.6.2.2 Curva característica da água no solo 103
3.7 Simulação numérica 105
3.7.1 - Parâmetros de Entrada 107

3.7.2 Dados de saída 110
3.8 Comparação do desempenho entre os tipos de cobertura estudados 110
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 113
4.1 Introdução 113
4.2 Fatores climatológicos 113
4.2.1 Precipitação 113
4.2.2 Outros dados climatológicos 116
4.3 Características geotécnicas do solo empregado nas camadas de cobertura 119
4.4 Parâmetros hidráulicos do solo empregado nas camadas de cobertura 124
4.5 Resultados do monitoramento em campo 136
4.5.1 Monitoramento da umidade do solo 137
4.5.2 Monitoramento da temperatura do solo 148
4.5.3 Resultados de sucção do solo da camada de cobertura 151
4.5.4 Medição da infiltração 153
4.6 Observações visuais ao longo do monitoramento das camadas estudadas 159
4.6.1 Integridade das coberturas 160
4.6.2 Estrutura do solo na cobertura convencional vegetada 162
4.7 Resultados da simulação numérica 165
4.7.1 Cobertura convencional 165
4.7.2 Barreira capilar 168
4.7.3 Cobertura convencional vegetada 171
4.8 Desempenho das camadas de cobertura estudadas 174
4.8.1 Cobertura convencional 175
4.8.2 Barreira capilar 180
4.8.3 Cobertura convencional vegetada 186
4.9 Comparação do desempenho entre os tipos de cobertura estudados 193
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 197
5.1 Recomendações 198
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 199
APÊNDICE 210

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Em um mundo de crescente aumento populacional, destaca-se a necessidade de equacionar a problemática da disposição final dos resíduos, gerados em quantidades cada vez maiores, que por sua vez, tem importantes implicações ambientais, principalmente no que diz respeito à qualidade do ar e das águas subterrâneas.

Para prevenir o contato humano e ambiental com os resíduos, a implantação de aterros sanitários, sobretudo no Brasil, tem sido estimulada. A geração de lixiviados é um dos principais problemas na operação dos aterros sanitários, uma vez que sua coleta e tratamento representam significantes custos operacionais. A água da chuva que não é removida por evapotranspiração ou drenagem lateral, ao alcançar a massa de resíduos depositados em um aterro sanitário infiltra em função das características do meio poroso, possibilitando a mobilização de contaminantes que podem alcançar as águas subterrâneas, ocasionando passivos ambientais.

Para Benson (2001), são três elementos de um aterro de resíduos que se relacionam com a contaminação por lixiviados e seus impactos no meio ambiente, e devem, portanto, ser levados em conta na estratégia de gerenciamento a ser seguida: camadas de proteção de base, sistema de coleta de lixiviados e coberturas. Diante disso, sistemas de cobertura têm sido empregado para o controle da migração do lixiviado, com o principal objetivo de formar uma barreira contra a infiltração de água de precipitação (ZORNBERG & MCCARTNEY, 2007).

Os sistemas de cobertura final são empregados em todos os locais de disposição de resíduos, tais como os aterros sanitários e em remediação de locais impactados pela exploração extrativista (jazidas mineradoras, carboníferas, etc). O propósito destes sistemas é atuar na contenção dos resíduos e dos compostos por eles originados (lixiviados e gases), através do controle da entrada de água e do ar dentro da massa de resíduos. Outros objetivos são de ordem paisagística, de saúde pública e bem-estar. São

sistemas projetados e construídos para permanecerem por décadas ou centenas de anos sem demandar maiores manutenções. Segundo Hauser (2009), dentre os diversos benefícios dos sistemas de coberturas, três devem pautar os projetos destes sistemas:

- Minimizar a infiltração em direção aos resíduos;
- Isolar os resíduos do contato com a atmosfera;
- Controlar a emissão de gases.

No Brasil, onde existem grandes quantidades de lixões, entre outros tipos de locais reservados a depósitos de resíduos estabelecidos sem ter sido levado em conta a necessidade de *liners* (barreiras impermeáveis usadas na fundação do aterro) e outros requisitos de proteção contra a migração de lixiviados para o ambiente, as coberturas finais tornaram-se uma das poucas, senão a única medida restante para minimizar este problema.

A pesquisa acadêmica voltada para sistemas de cobertura começou a ganhar força no início da década de 90, em meio ao advento de regulamentação federal nos Estados Unidos, através da RCRA (*Resource Conservation and Recovery Act*) relacionada aos requisitos para construção, operação e cobertura de aterros de resíduos. No final desta década e início dos anos 2000, o desenvolvimento do programa ACAP (Alternative Cover Assessment Program) impulsionou a publicação de novos trabalhos e tecnologias. No Brasil, ao contrário, são notadamente escassos os trabalhos desenvolvidos, que apareceram ao longo dos anos 2000, com mais intensidade a partir de 2005, tanto na área de resíduos de mineração, quanto na área de resíduos urbanos.

Segundo Benson (2001), o desenvolvimento de trabalhos no tema iniciou-se em conjunto com a introdução de *liners* e coberturas de solo argiloso compactado, com o objetivo de limitar a contaminação de águas subterrâneas. Este objetivo não foi mudado, porém com o decorrer dos anos, os *liners* e coberturas utilizadas mudaram com o desenvolvimento de novas tecnologias como a introdução de novos materiais e configurações. Estas mudanças foram motivadas principalmente pelo desejo de maior redução da geração de lixiviados e empregar técnicas de melhores custo-benefício e praticidade.

Diante da necessidade de reduzir custos e melhorar o desempenho do sistema de coberturas, tem sido fomentado o desenvolvimento de sistemas de cobertura alternativos. São exemplos os trabalhos desenvolvidos sobre camadas evapotranspirativas e as barreiras capilares (BENSON et al., 2001; KIEL et al., 2002; ZORNBERG et al, 2003; KAVAZANJIAN & DOBROWOLSKI, 2003; BENSON et al., 2004; UBALDO, 2005; PARENT & CABRAL, 2006; CABRAL et al., 2007; HAUSER, 2009; LOPES, 2011), produzindo informações relevantes, mas que não esgotaram o assunto, tendo em vista que foram realizados com diferentes materiais, locais e metodologias.

Nos aterros sanitários brasileiros ainda é predominante utilizar uma camada de solo compactado como cobertura. Este tipo de cobertura sofre modificação nas suas propriedades ao longo do tempo, devido às variações climáticas e ambientais. Diferentemente dos *liners* as coberturas são expostas a condições de contínua interação com a atmosfera (BENSON, 2001). Em regiões úmidas, o desempenho destas camadas também pode ser reduzido na medida em que ciclos prolongados de expansão e contração promovem o aparecimento de trincas e rachaduras, comprometendo, conseqüentemente, a sua integridade e funcionalidade. No Brasil, em virtude de condições climáticas muito variadas, o estudo da interação entre o material de cobertura de aterros com o clima local é fundamental para garantir a adequação do sistema de camadas empregado na disposição final de resíduos sólidos.

Diante disso, é de crucial relevância contribuir para a busca da diminuição da geração de lixiviados em aterros de disposição final de resíduos brasileiros, não somente por meio de avaliação das práticas reais relacionadas ao emprego de camadas de cobertura convencionais, como também estudando alternativas potenciais para as condições de pluviosidade elevada presente em várias localidades do território brasileiro.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é comparar o desempenho de sistemas de cobertura em um aterro de disposição de resíduos sólidos, em relação a infiltração da água pluvial em sistemas de cobertura na fase de operação do aterro.

1.2 Objetivos específicos

1) Comparar o desempenho da cobertura alternativa do tipo barreira capilar com o do sistema convencional em diferentes regimes pluviométricos, por meio avaliação de fatores de desempenho.
2) Avaliar o efeito da inclusão de uma camada protetora vegetada na cobertura convencional no seu desempenho.
3) Avaliar o comportamento da umidade do solo ao longo do tempo para cada sistema de cobertura estudado.
4) Avaliar o comportamento da condutividade hidráulica do solo saturado para cada sistema de cobertura estudado.
5) Avaliar a integridade ao longo do tempo dos sistemas de cobertura estudados.
6) Avaliar dados de simulação numérica do desempenho dos sistemas de cobertura e fazer uma comparação entre os dados de campo com os obtidos na modelagem. (realizar é etapa e não objetivo)
7) Avaliar diferenças, na cobertura convencional, entre tipos de solo neste tipo de cobertura.

Para cumprir os objetivos propostos, este trabalho apresenta uma revisão de literatura focada na questão do desempenho das coberturas empregadas em aterros de disposição de resíduos sólidos (Capítulo 2), a metodologia experimental (Capítulo 3) e os resultados obtidos com sua discussão (Capítulo 4), sendo finalizado com uma conclusão (Capítulo 5).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados tópicos de interesse à questão do desempenho de coberturas em aterros de resíduos, sendo para tanto, além de apresentada uma visão geral da disposição final de resíduos, introduzidos conceitos relevantes ao entendimento da infiltração da água no solo, cuja ocorrência se relaciona diretamente com o primordial objetivo deste importante componente do sistema de proteção, sendo, adicionalmente, abordados os tipos de cobertura mais utilizados ou estudados, métodos de avaliação de desempenho, incluindo alguns trabalhos desenvolvidos sobre o tema.

2.1 Disposição final de resíduos sólidos e geração de lixiviados

O manejo de resíduos perigosos e resíduos sólidos urbanos podem ter importantes implicações com a qualidade das águas subterrâneas. A tendência predominante no manejo de resíduos nos mundo desenvolvido é a disposição e o isolamento dentro de locais apropriados a fim de minimizar o contato humano e ambiental.

Pela definição da ABNT (2004), “resíduos sólidos são resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade, de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

Os resíduos domiciliares, bem como aqueles com características similares, como os comerciais, e os resíduos da limpeza pública normalmente são

encaminhados para a disposição em aterros municipais. No caso dos resíduos comerciais, estes podem ser aceitos para coleta e disposição no aterro desde que autorizado pelo órgão responsável pela limpeza pública municipal (D'ALMEIDA & VILHENA, 2000).

A classificação normalmente utilizada dos resíduos sólidos é aquela apresentada pela norma técnica ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004)

- Classe I - Resíduos Perigosos - São aqueles que apresentam periculosidade, conforme definido anteriormente, ou uma das características seguintes: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.

- Classe II-A - Não Inertes - São aqueles que não se enquadram na classe I ou II-B. Os resíduos classe II-A podem ter as seguintes propriedades: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

- Classe II-B - Inertes - São aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente. Além disso, quando amostrados de forma representativa e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente não têm nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

As formas mais usuais de disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil são os lixões (ou vazadouros), os aterros controlados e os aterros sanitários. Nos lixões, o resíduo é depositado sobre o solo natural, a céu aberto, sem controles quanto ao volume, classe, periculosidade, compactação, entrada de pessoas ou animais e sem nenhum tipo de proteção ambiental ou de saúde pública. É uma forma de deposição desordenada sem compactação ou cobertura dos resíduos, o que propicia a poluição do solo, ar e água, bem como a proliferação de vetores de doenças. (CASTILHOS JUNIOR et al., 2003).

Na opinião de D'ALMEIDA & VILHENA (2000), os aterros controlados se distinguem dos lixões apenas pelo controle de entrada de pessoas e animais, pela compactação e cobertura dos resíduos, não havendo, no entanto, medidas de controle ambiental, tais como, impermeabilização do solo, tratamento dos gases e do lixiviado.

Um aterro sanitário é definido pela norma NBR 8419 (ABNT, 1992), como "Uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos á saúde e à sua segurança, minimizando impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos".

Um importante fator de estímulo ao emprego de aterros sanitários no Brasil foi o advento da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei no. 12.305/10, regulamentada pelo Decreto no 7.404/10), que proibiu o lançamento de resíduos em lixões, visando a erradicação dessas unidades em todo território nacional (BRASIL, 2010).

Todas as formas de disposição final de resíduos representam potenciais fontes de impacto ambiental, principalmente no que diz respeito à geração de biogás e de lixiviados.

De acordo com El -Fadel et al. (2002) os lixiviados são formados quando o teor de umidade dos resíduos excede sua capacidade de campo (definida como a máxima umidade que é retida em um meio poroso sem produzir percolação). O processo de formação do lixiviado em aterros de RSU é influenciado por muitos fatores que podem ser divididos em:

(i) fatores que contribuem diretamente com a umidade do aterro (chuva, águas subterrâneas, conteúdo de umidade inicial, recirculação, co-disposição de resíduos líquidos e a decomposição do mesmo);

(ii) fatores que afetam a distribuição de umidade dentro do aterro (idade do resíduo, pré-tratamento, recalque, material utilizado na parede lateral do aterro, compactação, permeabilidade, tamanhos das partículas, densidade, vegetação, cobertura, geração e transporte de calor e gás)

Vários trabalhos têm sido realizados para, através do balanço hídrico, prever a geração ou o nível de variação do lixiviado em aterros (HAMADA, 1997; CAPELO NETO et al., 1999; MARQUES & VILAR, 2003; SIMÕES et al., 2003; FELLNER et al., 2003; FERREIRA, 2006; PADILLA, 2007; SÃO MATEUS, 2012).

A entrada de água nas células do aterro é, portanto, um componente relevante e precisa ser cuidadosamente estudado em um projeto ou gerenciamento de aterros sanitários, sendo, por isso, utilizados alguns tipos de barreiras, tais como as de proteção na sua fundação e na cobertura final.

Camadas de cobertura final são utilizadas frequentemente como estratégia para reduzir a quantidade de água que infiltra dentro de solos contaminados e locais de disposição de resíduos. Reduzir o volume de água infiltrada reduz a taxa de geração de lixiviados e o risco de contaminação de águas subterrâneas (BENSON et al., 2001). Entretanto, projetar uma barreira verdadeiramente impermeável, ou seja, a que resulte em infiltração da água igual a zero é inviável economicamente. Por isso, o objetivo em um projeto deve ser minimizar a infiltração (ZORNBERG & MCCARTNEY, 2007).

2.2 Introdução aos sistemas de cobertura em aterros de resíduos

Sistemas de cobertura final são frequentemente utilizados como estratégia de remediação quando se intenta reduzir a quantidade de água infilitrada em solos contaminados e depósitos de resíduos (BENSON et al., 2001).

As coberturas em um aterro são empregadas em diferentes momentos durante a vida útil do aterro. Nos aterros modernos, todos os dias durante a operação normal há uma cobertura de fina camada sobre os resíduos para proteger contra a ação dos roedores, aves, vento, etc; em áreas inativas do aterro, são utilizadas coberturas denominadas intermediárias; entretanto, os sistemas que merecem maior atenção são os de cobertura final (HAUSER, 2009).

Sistemas de cobertura final devem ser projetados para permanecer em um lugar como proteção por longos períodos. Os principais fatores a serem levados em conta nos projetos são: clima (precipitação, radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar e vento); solos; vegetação; características

do aterro; produção de gás; utilização posterior da área do aterro (HAUSER, 2009).

De acordo com Peng & Jiang (2009), o solo é um material muito empregado em sistemas de cobertura em aterros de resíduos, sejam eles urbanos, industriais, de mineração, perigosos, radioativos e outros; em um panorama internacional, apesar dos geossintéticos serem usualmente utilizados, houve um crescente aumento do uso do solo como cobertura, pelo seu custo-benefício vantajoso.

Não há na literatura uma clareza quanto à classificação e terminologia dos sistemas de cobertura em aterros. De acordo com Benson (2001), os tipos de cobertura podem ser divididos em duas categorias, coberturas resistivas e coberturas de balanço hídrico, refletindo a metodologia usada para limitar a infiltração. Coberturas resistivas são compostas por uma barreira hidráulica (geralmente solo argiloso compactado, geossintéticos ou mistura de ambos), que limitam o fluxo de água por impermeabilização. Coberturas de balanço hídrico são as que limitam a infiltração ao armazenar a água e a devolver para a atmosfera através da evaporação e transpiração das plantas. Zornberg & Mccartney (2007) e Peng & Jiang (2009) seguem similar linha de classificação, utilizando o termo cobertura evapostranspirativa no lugar de cobertura de balanço hídrico, sendo que esta última referência acrescenta um terceiro tipo, as coberturas mistas. Para Benson et al. (2001), todas as coberturas, independente do seu tipo, são evapotranspirativas, por isso tal termo não deve ser utilizado para classificar um tipo de cobertura. Hauser (2009), utilizando outro critério, agrupa as coberturas em convencionais e alternativas.

De todos estes termos, o único que realmente não é encontrado com muita frequência na literatura é o termo “cobertura de balanço hídrico”, restrito a um pequeno grupo no meio acadêmico. Em geral, há uma tendência a aceitar a existência de pelo menos dois grupos, sendo que camadas de cobertura convencionais são as coberturas resistivas. E todas que não forem resistivas, não são convencionais, são alternativas. Por esse motivo, a terminologia convencional / alternativa é a que será seguida ao longo deste trabalho. Exemplos mais relevantes de sistemas alternativos são as coberturas evapotranspirativas e a barreira capilar.

A Tabela 2.1 apresenta as classificações de coberturas segundo estes autores.

Tabela 2.1 – Classificação de sistemas de cobertura

Autor	Primeiro grupo	Segundo grupo	Terceiro grupo
Benson (2001)	Coberturas resistivas (Exemplos: coberturas de solo argiloso compactado; coberturas de geossintéticos)	Coberturas de balanço hídrico (Exemplos: monolíticas; barreiras capilares; evapotranspirativas	--x--
Zornberg & Mccartney (2007)	Coberturas resistivas (Exemplos: coberturas de solo argiloso compactado; de geossintéticos	Coberturas evapotranspirativas	--x--
Hauser (2009)	Coberturas convencionais (Exemplos: coberturas de solo argiloso compactado; de geossintéticos	Coberturas alternativas (todas as diferentes das convencionais, incluindo barreiras capilares e evapotranspirativas)	--x--
Peng & Jiang (2009)	Coberturas resistivas	Coberturas evapotranspirativas	Coberturas mistas

2.3 Conceitos de hidráulica relevantes ao desempenho dos sistemas de coberturas

Parâmetros hidráulicos do solo devem ser conhecidos para a seleção e avaliação da melhor cobertura a ser utilizada (BENSON & BAREITHER, 2012; ALBRIGHT et al., 2010). Para o monitoramento de sistemas de cobertura,

devem ser levados em consideração vários parâmetros, sendo que os relacionados ao fluxo da água são: condutividade hidráulica, umidade, potencial matricial e infiltração (PENG & JIANG, 2009). Para Benson et al. (2007), sistemas de coberturas baseadas no balanço hídrico são altamente influenciados pelas propriedades hidráulicas dos solos utilizados, especificamente, a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), condutividade hidráulica não saturada ($K\psi$) e curva característica da água no solo (SWCC – soil water characteristic curve).

Coberturas com alto K_{sat}, variação gradual de $K(\psi)$ e uma curva característica com alta sucção de entrada de ar geralmente resultam em menor escoamento superficial e maior infiltração APIWANTRAGOON et al., 2003; ZORNBERG et al., 2003; BENSON et al., 2005). A propriedade do solo que mais influencia no processo de infiltração é a condutividade hidráulica não saturada, que está diretamente relacionada à umidade, à sucção do solo e à condutividade hidráulica saturada (UBALDO et al., 2007).

As propriedades hidráulicas dos solos empregados são parâmetros necessários à análise numérica de previsão de desempenho de coberturas. Também são utilizadas para determinação da espessura requerida no caso de coberturas de balanço hídrico (FAYER et al.,1992; KHIRE et al. 1997; ZORNBERG et al. 2003; BENSON & CHEN, 2003; BENSON et al. 2005)

2.3.1 Propriedades hidráulicas dos solos

Nos vazios de solos não saturados estão presentes tanto ar como água. As quantidades de ar e água, geralmente medidos em base volumétrica, influenciam altamente o comportamento hidráulico do solo. A Figura 2.3 ilustra algumas das mais comuns relações empregadas para análise do processo de fluxo de água em solos não saturados. O teor de umidade volumétrica (θ) é definido como a relação entre o volume de água (V_W) e o volume total de uma amostra (V_T). A porosidade (n), que é a relação entre o volume de vazios ($V_V = V_a + V_W$) e o volume total de uma amostra, corresponde à umidade volumétrica na saturação ($n = \theta s$). O grau de saturação (S), normalmente utilizado para

normalizar a umidade do solo, é a relação entre a umidade volumétrica (θ) e a porosidade (S = θs/n). Por último, o volume de ar no solo (V_a) é a diferença entre a porosidade e a umidade volumétrica (ZORNBERG & MCCARTNEY, 2007).

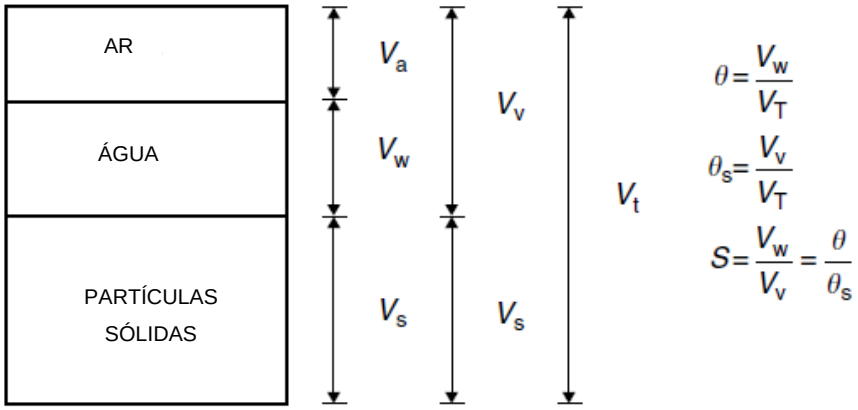

Figura 2.1 – Diagrama da fase volumétrica de solos não saturados (adaptado de ZORNBERG & MCCARTNEY, 2007).

Para medição do conteúdo de água no solo, Peng & Jiang (2009) recomendam o uso de sensores para o monitoramento em coberturas de aterros. Os mais comuns são os tipos dilétricos, resistivos e sonda de nêutrons, sendo que todos eles apresentam algumas limitações: o primeiro pode ser afetado pela salinidade, caso ela venha ocorrer; o segundo tipo não tem bom desempenho de longo prazo; e o terceiro tipo, não é indicado para medições próximo à superfície.

2.3.1.1 Sucção e curva característica da água no solo

Em um meio não saturado, a água é retida entre os poros contra a força gravitacional por uma combinação de pressões de adsorção e de capilaridade. Segundo Zornberg & McCartney (2007), pressões de adsorção estão presentes nos solos devido a campos elétricos e forças de atração de van der Waals que tendem a direcionar a água às partículas do solo (principalmente em argilas altamente plásticas, onde as cargas negativas nos dipolos de água e a

superfície das partículas de argila interagem com os cátions nos poros). A pressão de capilaridade é quantificada como a diferença entre a pressão do ar no poro e a pressão da água no poro. A água é o fluido de umedecimento para a maioria das partículas, o que implica que os meniscos ar-água entre individuais partículas de solo são convexos, membranas tensionadas. Por isso, a pressão do ar é maior que a pressão da água, com magnitude negativa. As pressões de adsorção e de capilaridade são consideradas normalmente em conjunto, como se fosse uma única variável, sob a denominação sucção mátrica (ψ), em unidades de pressão (kPa). A ascensão capilar um uma pipeta é uma adequada analogia para avaliar a influência dos tamanhos dos poros na sucção mátrica, que é dada pela expressão:

$$\psi = Pa - Pw = h_c \rho_w g = \frac{2\sigma_{aw} \cos\gamma}{R} \quad (1)$$

Onde P_a é a pressão do ar no poro, P_w é a pressão da água no poro; h_c é a altura de ascensão capilar em uma pipeta de raio R, ρ_w é a densidade da água, g é a aceleração da gravidade, σ_{aw} é a tensão superficial entre a água e o ar e γ é o ângulo de contato de umedecimento (para minerais de quartzo, normalmente é 10 graus). A equação 3 assume que o ar está sob pressão atmosférica (P_a= 0) e indica que a sucção é inversamente proporcional ao raio do poro. Por isso, para a mesma umidade volumétrica, um solo de granulometria fina (com raio de poro comparativamente menor) terá uma sucção maior que um solo de granulometria mais grossa. A relação entre a umidade e a sucção é, portanto, relacionada à distribuição do tamanho dos poros do solo conforme será discutido posteriormente.

Para obter medidas de sucção mátrica, os tensiômetros são os instrumentos mais utilizados em campo. Existem, porém, outras técnicas para cobrir as faixas de medida não alcançada pelos tensiômetros. De acordo com Campos (1994), a sucção total em solos não saturados (que é a soma da sucção mátrica e sucção osmótica) é passível de ser determinada no campo, utilizando-se os psicrômetros ou a técnica do papel-filtro.

A Tabela 2.2 apresenta uma relação de técnicas e suas respectivas faixas de utilização.

Tabela 2.2 – Métodos de medição de sucção, mensurando e faixa de medição

Método	Tipo de sucção medida	Faixa de medição (kPa)
Tensiômetro	Matricial e total	0-90
Aparelho extrator de Richards	Matricial	0-1500
Condutividade térmica	Matricial	0-400
Condutividade elétrica	Matricial e osmótica	20-1500
Psicrometria	Total e osmótica	100-8000
Funil de placa porosa	Matricial	0-70
Papel-filtro	Matricial e total	0-29000

Fonte: Vilar, 2002

A relação entre umidade volumétrica e sução do solo, denominada curva característica da água no solo (conhecida em inglês como SWCC – *soil water characteristic curve*), também denominada curva de retenção da água no solo (SWRC – *soil water retention curve*), é utilizada para vários propósitos. A curva característica é a representação gráfica da relação entre o conteúdo volumétrico de água e a sucção no meio poroso (Figura 2.4).

Um importante detalhe da SWCC é o chamado valor de “entrada de ar”. Na Figura 2.3, a curva de secagem inicia-se na umidade de saturação (no qual a sucção é nula). O valor de entrada de ar representa a sucção acima da qual o ar se faz presente na estrutura do solo. Partindo do início da secagem de uma amostra de solo saturada, não há fluxo de água até que a sucção

Os materiais granulares, como a areia e os geossintéticos apresentam uma resposta altamente não linear, com um significante decréscimo na umidade volumétrica (e grau de saturação) dentro de uma faixa pequena de sucção. Já os materiais de textura fina (como argilas e siltes) apresentam um decréscimo mais gradual de umidade com o aumento da sucção. A falta de linearidade observada nesta relação é em parte causada pela faixa de distribuição de tamanho de poros para estes materiais (ZORNBERG & MCCARTNEY, 2007).

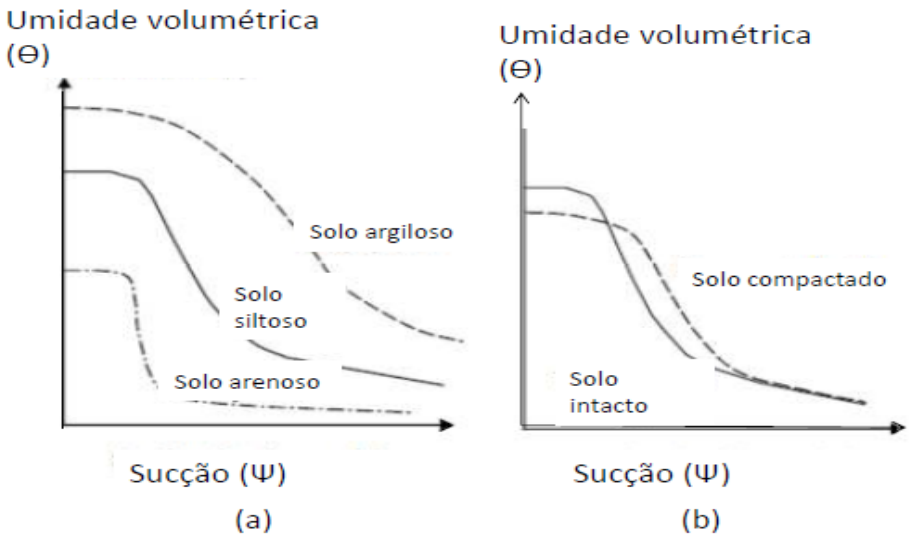

Figura 2.3 : Curvas características da água no solo típicas (a) e influência da estrutura da estrutura do solo sobre a curva característica da água no solo (Adaptado de Gerscovich & Sayão, 2002)

A Tabela 2 apresentou técnicas de medição da sucção, entretanto apenas algumas delas são comumente utilizadas para determinação de curva característica da água no solo. Para Zornberg & Maccartney (2007), dois grupos de técnicas tem sido mais utilizadas para obter a SWCC, as técnicas físicas e as termodinâmicas. As técnicas físicas são geralmente utilizadas para baixas sucções (abaixo de 1500 kPa), enquanto as técnicas termodinâmicas são usadas para sucções altas. O primeiro grupo (técnicas físicas) envolve a aplicação de sucção na amostra saturada para a retirada lenta da água. O fluxo

continua até que a umidade e a sucção entram em equilíbrio. Ainda segundo os autores, a técnica mais comum que adota esta metodologia é a técnica da translação de eixos. Um ensaio comum baseado nesta técnica é a câmara de pressão, que consiste em colocar uma amostra em um recipiente de cerâmica e aplicar pressões, causando a saída da água dos poros da amostra, atravessando a cerâmica se a pressão da água no lado exterior é mantido à pressão atmosférica (zero). No equilíbrio a pressão do ar corresponde a sucção. O volume que sai é medido usando um frasco de Mariotte. Este procedimento é repetido sucessivamente a pressões cada vez maiores, gradualmente secando a amostra. Depois a pressão pode ser diminuída para medir o comportamento de umedecimento. Ao fim do ensaio, a umidade gravimétrica pode ser medida destrutivamente e a umidade a cada incremento de pressão pode ser calculada a partir dos resultados das medições do volume coletado externamente. Outra técnica existente, a coluna suspensa, também envolve um recipiente de cerâmica, mas um manômetro é conectado na sua base. Uma pressão negativa da água é aplicada ao nível da água no interior do recipiente de cerâmica.

O segundo grupo de técnicas (técnicas termodinâmicas) implica em permitir que a água evapore em uma câmara fechada em condições de umidade relativa controlada. Outra técnica deste grupo é o uso de um dispositivo que infere a sucção do solo (mátrica e osmótica), chamado higrômetro espelho frio, o qual mede a pressão de vapor no solo, que é relacionada à temperatura a qual a umidade condensa em um espelho. Quando a condensação ocorre, uma mudança nas propriedades ópticas do espelho é detectada (WANG & BENSON, 2004),

Técnicas convencionais para definir a SWCC exigem tempo significativo para obtenção de dados limitados. Por exemplo, determinar a SWCC para uma amostra de argila de alta plasticidade pode levar vários meses. Também, métodos convencionais requerem o uso de várias amostras e medições destrutivas de umidade. Problemas específicos de ensaios para determinação da SWCC incluem difusão do ar através dos poros da cerâmica utilizada, falta de controle de volume durante a secagem e umedecimento e falta de aptidão para conseguir condições representativas de campo. Uma centrifugação pode

ser utilizada para aliviar deficiências do uso de técnicas convencionais. Amostras saturadas são colocadas nos recipientes de cerâmica que conduzem somente líquido. Durante a centrifugação, a força sobre o corpo causa a saída da água através da cerâmica enquanto que o ar entra na superfície da amostra. O perfil de sucção dentro da amostra pode ser definido a base é mantida a saturada (sucção zero). A distribuição de sucção obtida ao equilíbrio (quando o fluxo cessa) é:

$$\psi(r) = \frac{\rho_w \omega^2}{2}\left(r_0^2 - r^2\right) + \psi(0) \qquad (2)$$

Onde r_o é o raio externo da amostra centrifugada, r é a distancia em relação ao centro de rotação com referência no raio externo ω é a velocidade angular e $\psi(0)$ é a sucção na região da base da amostra (zero se o prato de cerâmica saturado é usado como condições de contorno da base). Técnicas analíticas podem ser utilizadas para associar a umidade média (medida destrutivamente) com a sucção na superfície do solo (FORBES, 1994).

A modelagem experimental é geralmente utilizada para quantificar a SWCC. Segundo Zornberg & Maccartney (2007), embora o modelo de Brooks & Corey (1946) é o mais indicado para representar a sucção de entrada de ar, o modelo de van Genuchten (1980) é mais utilizado em análise numérica porque é diferenciável para uma faixa mais ampla de sucções. Este modelo é dado por:

$$\theta = \theta_r + \left(\theta_s - \theta_r\right)\left[1 + \left(\alpha\psi\right)^N\right]^{-(1-(1/N))} \qquad (3)$$

que é a relação empírica para estimar a curva de retenção de água no solo, onde θ é a umidade volumétrica; θ_s é a umidade de saturação; θ_r é a umidade residual. α e N são constantes do modelo. ψ é o potencial total de água no solo.

Estimativas preliminares da SWCC também podem ser obtidas utilizando um banco de dados baseado na distribuição granulométrica de solos (FREDLUND & XING, 1994).

De acordo com Gerscovich & Sayão (2002), as equações propostas por Gardner (1958), Van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994) fornecem um bom ajuste das curvas experimentais de solos brasileiros.

2.3.2 Fluxo da água através do solo

De acordo com Zornberg & McCartney (2007), o fluxo da água através dos solos é dirigido por um gradiente de energia hidráulica, o qual é quantificado pelo potencial total de fluido (energia por unidade de massa e água). O potencial total de fluido é dado (na forma expandida) pela equação de Bernoulli:

$$\Phi = gz + \frac{1}{2}\left(\frac{v}{n}\right)^2 + \frac{-\psi}{\rho_w} + \frac{P_o}{\rho_w} \tag{4}$$

onde Φ é o potencial do fluido, z é a distância vertical da referência, *v* é a velocidade de infiltração básica, n é a porosidade, ρ_w é a densidade da água e P_o é a sucção osmótica. Na equação, os quatro termos no lado direito corresponde a energia potencial, a energia cinética, a energia devido a pressão da água e a energia devido à osmose. A velocidade de fluxo (v/n) é comparativamente menor, o que torna desprezível a componente energia cinética, no caso de camadas de cobertura. A sucção osmótica é geralmente considerada constante através de uma camada de cobertura e conseqüentemente, não contribui para gerar o gradiente hidráulico.

2.3.2.1 Condutividade hidráulica do solo

De acordo com Zornberg & Mccartney (2007), a relação entre a condutividade hidráulica e a sucção, também referida como função K(ψ), proporciona uma medida da impedância sobre o fluxo de umidade devido ao decréscimo de umidade do solo. A condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) confere uma medida do mínimo de impedância ao fluxo de umidade através do solo. A Figura 2.5 apresenta valores de K(ψ) para diferentes materiais geotécnicos. Próximo à saturação, materiais granulares (areia e geotêxteis) tem alta condutividade hidráulica, enquanto que materiais de textura fina (siltes e argilas) tem menores condutividade hidráulica. Entretanto, assim que o solo seca, os materiais granulares acabam sendo menos condutivos do que os de textura fina, pois estes podem reter mais água nos poros com o aumento de sucção, ainda têm lugar para fluxo de água ocorrer, e portanto são mais condutivos. O desempenho superior de camadas evapotranspirativasem climas áridos em relação às convencionais pode ser atribuído à menor condutividade hidráulica do solo selecionado para a cobertura.

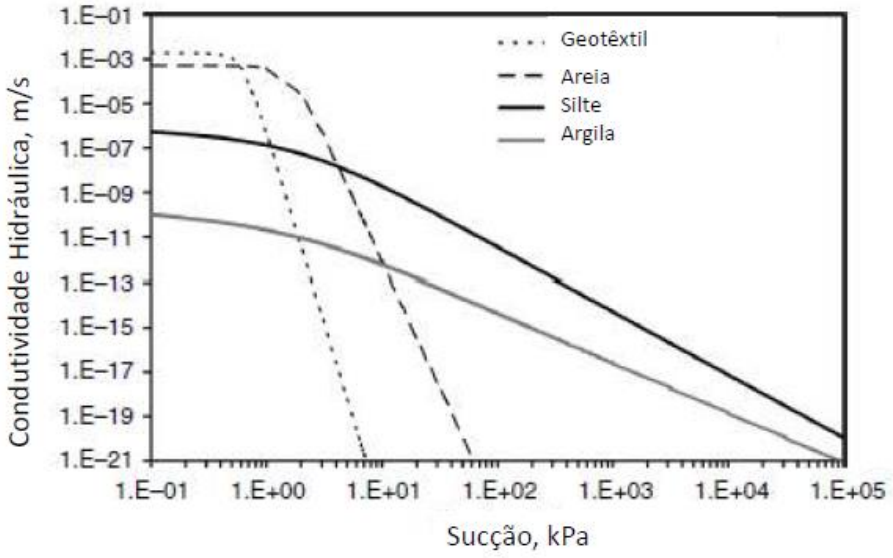

Figura 2.4 - Valores de K(ψ) para diferentes materiais geotécnicos (adaptado de ZORNBERG & MCCARTNEY, 2007)

Para determinar a função K(θ), cobrindo uma faixa maior de umidade, é comum a utilização do método do perfil instantâneo (HILLEL et al., 1972), que consiste na obtenção de medidas diretas no campo. Dentre as desvantagens, podem se destacar o consumo elevado de tempo e a mão-de- obra, tornando-se um dos grandes problemas para solos que apresentam camadas adensadas ou compactadas, onde o processo de drenagem é muito lento (JONG VAN LIER & LIBARDI, 1999). Medições de condutividade hidráulica do solo não saturado para reduzir o erro são viáveis, mas é demorado e caro, estando sujeitas a erros da mesma ordem de grandeza (BENSON & GRIBB, 1997).

Métodos convencionais para obtenção da condutividade hidráulica são custosos, demorados e propícios a erros experimentais. Em decorrência destas desvantagens, avanços no estudo de métodos para a determinação da função K(θ), baseada em outras características físicas, têm surgido, principalmente os baseados em dados obtidos a partir da curva característica de água no solo (TEIXEIRA et al., 2005). Por isso, a condutividade hidráulica geralmente é estimada com base na distribuição de tamanhos de poros tal como no modelo de van Genuchten-Mualem (1980):

$$\mathrm{K}(\theta) = K_{sat}\sqrt{\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}}\left[1-\left(1-\left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)^{1-N}\right)^{1/(1-N)}\right]^2 \qquad (5)$$

Onde K_{sat} é a condutividade hidráulica do solo saturado.

K(ψ) pode ser definida pela substituição da equação 7 na equação 8. Outras relações preditivas para a função K(ψ) são dadas por BURDINE (1953) e CAMPBELL (1974). Várias técnicas têm sido propostas para determinação direta da função K(ψ) em laboratório (BENSON & GRIBB, 1997). Técnicas convencionais envolvem o fluxo de um líquido através de uma amostra colocada em um permeâmetro. O fluxo é forçado através de pratos de cerâmica ou bombas de fluxo. Permeâmetros diferem em confinamento da

amostra e em tamanho, além de controle das condições de contorno e da disponibilidade de instrumentação.

De acordo com Zornberg & Mccartney (2007), para estimar a função K(ψ) pode-se utilizar processos de fluxo transiente ou de equilíbrio. Durante a umidade de equilíbrio e a infiltração em direção ao lençol freático, uma unidade de gradiente hidráulico é geralmente observada no perfil do solo, suficientemente distante da região do nível do lençol freático. Por isso, a sucção não muda com a profundidade e o fluxo é devido somente à gravidade. Neste caso, a condutividade hidráulica se iguala a velocidade de descarga imposta no estado de equilíbrio. Pontos adicionais são obtidos se mudar o fluxo imposto. Durante processos de fluxo transiente, os perfis de umidade e sucção são medidos como função da profundidade e do tempo, e a função K(ψ) pode ser estimada utilizando o método do perfil instantâneo (OLSON & DANIEL, 1979). Enquanto técnicas baseadas em processos de fluxo transiente rendem maior quantidade de informações sobre a função K(ψ), técnicas de estado de equilíbrio rendem informações mais confiáveis. Como para a SWCC, técnicas convencionais usadas para definir a função K(ψ) exigem tempo para obtenção de dados. Problemas específicos aos ensaios de determinação da função K(ψ) incluem efeitos de contorno, dificuldades na uniformidade da distribuição de água da bomba de fluxo para a amostra e procedimentos de ensaio cansativos. Para minimizar estas deficiências, ensaios de centrifugação têm sido utilizados em projetos envolvendo a configuração de coberturas evapotranspirativas (ZORNBERG et al., 2003).

2.3.2.2 Equação de Richards

A velocidade de descarga através do solo na direção vertical z pode ser estimada usando a lei de Darcy e equação 3, como a seguir:

$$v = \frac{Q}{A} = -\frac{K(\psi)}{g}\frac{\partial \Phi}{\partial z} = -K(\psi)\frac{\partial}{\partial z}\left(1 - \frac{1}{\rho_w g}\frac{\partial \psi}{\partial z}\right) \quad (6)$$

onde Q é a vazão, A é a área do solo perpendicular à direção do fluxo. O princípio da continuidade no controle de volume pode ser expresso como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial z} \tag{7}$$

onde o lado esquerdo representa a mudança no armazenamento hídrico do volume de controle e o lado direito, a mudança no fluxo através do volume de controle. Ao substituir a equação 3 na equação 4 obtém-se a equação que governa o fluxo 1-D através de materiais porosos não saturados, conhecida como equação de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \psi}\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(\psi)\left(1 - \frac{1}{\rho_w g}\frac{\partial \psi}{\partial z}\right)\right] \tag{8}$$

A equação de Richards é uma equação não linear, parabólica, que pode ser resolvida usando técnicas de diferenças finitas ou de elementos finitos. Usar soluções numéricas para a equação de Richards pode ser desafiante porque as funções constitutivas (K(ψ) e θ(ψ)) são altamente não lineares e podem ter derivadas nulas ou indefinidas. Dificuldades adicionais para resolver problemas de fluxo da água em solos não saturados surgem quando considerada a umidade removida pelas raízes das plantas, trincas devido à ressecamento, mudanças volumétricas. Este tipo de dificuldade é frequente nas coberturas de solo compactado empregadas nos aterros de resíduos, tornando-se um dos principais problemas a serem levados em conta nos estudos de desempenho destas coberturas.

2.4 Desempenho de coberturas em aterros de disposição de resíduos

Nesta tópico será dada uma visão geral sobre os tipos de coberturas e abordado pontos relacionados ao seu desempenho. Será dada ênfase a questão do desempenho em condições de clima úmido, no qual o presente trabalho encontra-se inserido.

2.4.1 Coberturas convencionais

A maioria das coberturas denominadas resistivas emprega um projeto similar que consiste de diversas camadas, cada qual com sua função. A camada mais baixa é a barreira hidráulica, composta por solo compactado ou geossintéticos. Camadas compostas incluem geossintéticos sobre a barreira hidráulica. Outras camadas podem ser incluídas, como por exemplo: camada de drenagem, camada protetora (vegetada), etc. O desempenho de uma cobertura do tipo resistiva está relacionado à muito baixa condutividade hidráulica para minimizar a infiltração (Peng & Jiang, 2009). É constituída uma barreira hidráulica, geralmente com valores de condutividade hidráulica de 10^{-9} m/s ou menos, para minimizar a infiltração e maximizar o escoamento superficial (Figura 2.1) (ZORNBERG & MCCARTNEY, 2007).

Segundo Hauser (2009), a maioria dos aterros de resíduos empregam coberturas convencionais porque no passado este tipo de cobertura foi aceito pelos regulamentadores governamentais. Havia um conceito errôneo de que as barreiras empregadas eram impermeáveis e duradouras, protegendo por décadas ou séculos. Ainda segundo o autor, nos EUA, regulamentos da RCRA estabeleceram duas possibilidades de cobertura a ser empregadas: (i) um conjunto de cinco ou mais camadas sobrepostas, sendo uma delas, ou mais, barreiras de baixa condutividade hidráulica, de 10^{-9} m/s ou menos.; (ii) uso de solo compactado de condutividade hidráulica, segundo o autor, menor do que 10^{-7} m/s.

O uso de geossintéticos como cobertura convencional apresenta a vantagem de ser mais resistente aos danos devido ao ressecamento do que as coberturas de solo argiloso compactado; porém, em longo prazo, não apresenta bom desempenho (HAUSER, 2009). A junção dos dois tipos de coberturas resistivas apresentou desempenho melhor do que as utilizadas

Na tentativa de ilustrar alguns pontos importantes em trabalhos de avaliação de desempenho de coberturas convencionais, o Quadro 2.1 apresenta alguns dados como o tipo de cobertura resistiva avaliado, a espessura da camada utilizada, a condutividade hidráulica saturada, a precipitação anual do local onde foi realizado o estudo (foram selecionados apenas de climas úmidos) e o resultado da avaliação de desempenho (total coletado em porcentagem da precipitação anual local).

Quadro 2.1 – Resultados de avaliação de desempenho de coberturas convencionais em climas úmidos

Referência	**Tipo de cobertura resistiva**	**Espessura**	**Ksat ($m.s^{-1}$)**	**Precipitação anual local (mm)**	**Precipitação que infiltrou através da cobertura (%)**
Melchior, 1997	Barreiras compostas	-	10^{-11}	865	8
Albright et al., 2004	Solo compactado	0,45m	10^{-9} a 10^{-10}	1191	10
Albright et al., 2006	Solo compactado	0,45m	10^{-9} a 10^{-10}	1056	25
Loehr & Haikola, 2003	Barreiras compostas	-	10^{-11}	1320	2

Para Peng & Jiang (2009), coberturas do tipo convencionais são as mais indicadas para locais de alta precipitação, nos quais camadas de solo argiloso permanecem saturadas ou próximo à saturação, o que evitaria a ocorrência de ressecamento. Apesar disso, ciclos de secagem e umedecimento acabam por possibilitar a ocorrência de rachaduras associada ao ressecamento da cobertura.

2.4.2. Coberturas alternativas

Segundo Hauser (2009), por causa das propriedades de retenção de água dos solos e do fato de que a maior parte da precipitação retorna à atmosfera pela evapotranspiração, processos naturais e contínuos, é possível empregar coberturas que não utilizem barreiras hidráulicas. Elas utilizam a capacidade natural de atuar como reservatório durante o período de infiltração da água da chuva e posterior remoção por evapotranspiração.

Segundo Khire et al. (2000), as coberturas alternativas atuam no balanceamento dos processos hidrológicos (precipitação, escoamento superficial, armazenamento hídrico, evapotranspiração) de forma a se obter limites aceitáveis de infiltração da água. Um sistema de cobertura alternativo eficiente proporciona um equilíbrio entre a capacidade de armazenamento hídrico do solo e a capacidade de remoção através do clima e da vegetação.

Para Barnswell & Dwyer (2011), a razão do interesse pelas coberturas alternativas reside no menor custo de construção e melhor desempenho ao longo do tempo em relação às convencionais. Há registros de que coberturas com camada de barreira composta ou coberturas de balanço hídrico têm desempenho bem melhor e pode efetivamente eliminar infiltração para os resíduos (Benson, 2001)

De acordo com Benson & Albright (2002), trabalhos realizados em aterros nos Estados Unidos, demonstraram que as coberturas alternativas em climas áridos e semi-áridos resultam em taxa de infiltração de cerca de 1 mm/ano, significativamente menor do que se estiverem em climas úmidos, entre 37 e 144 mm/ano. Para Barnswell & Dwyer (2011), coberturas evapotranspirativas tem sido testadas em locais com precipitação menor que 320mm/ano, e que resultem em baixas taxas de infiltração. Segundo Benson (2001), as coberturas de balanço hídrico podem ser até mesmo melhores para limitar a infiltração em climas áridos ou semi-áridos. A vegetação presente nestas condições climáticas são muito eficientes em absorver a água do solo, permitindo que a capacidade de armazenamento da camada se prolongue sem ser excedida até a estação seca. Peng & Jiang (2009) possuem similar opinião. Para os autores, os locais de climas áridos ou semi-áridos, por possuírem precipitação menor que a evaporação potencial e estações chuvosas bem definidas, durante a estação seca a umidade do solo é devolvida à atmosfera, e a capacidade de

armazenamento hídrico renovada para o próximo período chuvoso. Segundo Zornberg et al. (2003), a vegetação é crucial para a devolução da água à atmosfera.

Segundo Benson (2001), as coberturas de balanço hídrico podem ser classificadas em barreiras monolíticas e barreiras capilares. A primeira consiste de uma única camada espessa vegetada de solo de textura fina com alta capacidade de armazenamento. As barreiras capilares empregam contraste de textura entre duas camadas para formar uma quebra de capilaridade que impede o fluxo vertical enquanto o solo de textura mais fina não atingir a saturação. Este efeito ocorre devido à condutividade hidráulica não saturada do solo de textura mais grossa ser menor do que a do solo de textura mais fina, a um mesmo potencial matricial (STORMONT & ANDERSON, 1999; KHIRE et al., 1999).

Para Peng & Jiang (2009), há três tipos de coberturas evapotranspirativas: monolíticas, barreiras capilares e anisotrópicas. Configurações utilizando coberturas resistivas e evapotranspirativas conjuntamente podem ser agrupadas em um terceiro tipo de cobertura, com a vantagem de explorar as vantagens de ambas. Entretanto, o problema da ressecamento em camadas resistivas não é eliminado e pode comprometer o desempenho da cobertura.

2.4.2.1 Camadas de cobertura monolíticas

Camadas de cobertura monolíticas são coberturas que consistem de uma única camada de solo colocada diretamente sobre a massa de resíduos (ZORNBERG et al., 2003). Para este tipo de sistema de camadas, o controle da infiltração da água ocorre mais em função da maximização do escoamento superficial. O solo executa dupla função, a de atuar como substrato para a vegetação e como barreira hidráulica. É empregada uma camada de fundação com o mesmo tipo de solo, buscando nivelar a superfície acima dos resíduos (ZORNBERG & MCCARTNEY, 2007).

Os componentes básicos da cobertura monolítica são uma camada de solo com teor de matéria orgânica apropriado para crescimento da vegetação, sobreposta à camada barreira hidráulica, normalmente colocada sobre o material a ser coberto. A camada superior, além da função estética, tem os objetivos de garantir a proteção da camada de cobertura contra agentes

erosivos, aumentar a evapotranspiração e minimizar o aparecimento de trincas na camada barreira (HAUSER, 2009).

De acordo com Zornberg & Mccartney (2007), os aspectos principais a serem considerados em projetos com camadas de cobertura monolíticas são: a caracterização das propriedades hidráulicas e a adequada determinação da espessura da camada. Ainda segundo o autor, projetos requerem a seleção da espessura da camada e armazenamento da água no solo suficiente para manter a infiltração em um nível mínimo permitido, dadas as condições climáticas previstas para o lugar onde será instalada.

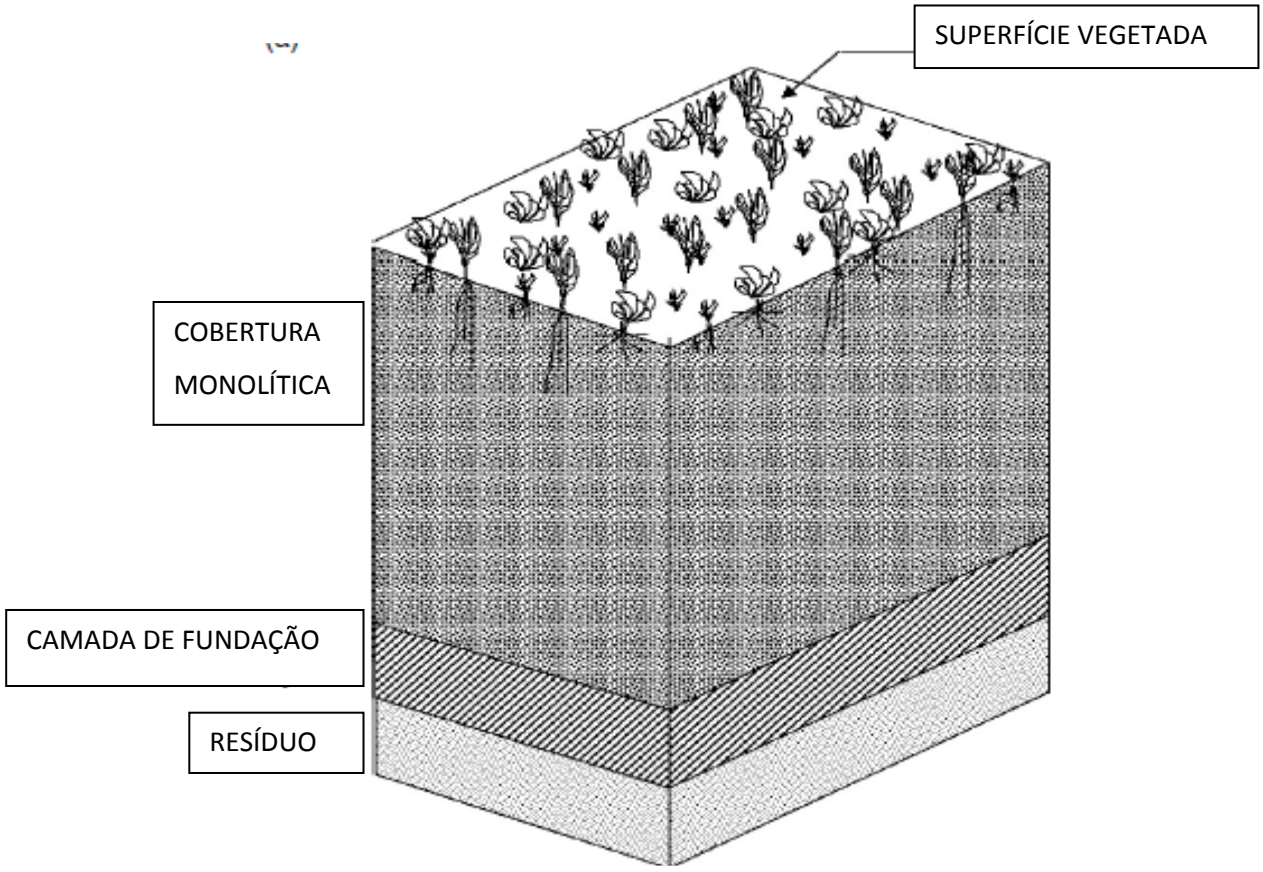

Figura 2.6 - Esquema de uma cobertura monolítica (adaptado de ZORNBERG & MCCARTNEY, 2007)

2.4.2.2 Barreiras capilares

Outro tipo de cobertura alternativa que tem ganhado importância, a barreira capilar consiste basicamente no emprego de solos de textura fina sobre materiais granulares. De acordo com Ubaldo et al. (2007), o uso de barreiras

capilares é uma das soluções encontradas para enfrentar o problema da drenagem ácida em áreas de mineração. Igual constatação é apresentada em Bussière et al. (2003) e Ribeiro et al. (2010). Coberturas com efeito da barreira capilar podem ser utilizadas como cobertura final em aterros sanitários, principalmente após seu fechamento (BARTH & WOHNLICH, 1999; STORMONT & ANDERSON, 1999).

Geralmente, a barreira capilar é constituída de camadas de solo, sendo uma de solo de textura fina sobre outro de textura grossa (Figura 2.2). A diferença entre as propriedades hidráulicas dos dois tipos de solos maximiza a capacidade de armazenamento de água (SHACKELFORD et al., 1994; KHIRE et al., 1999).

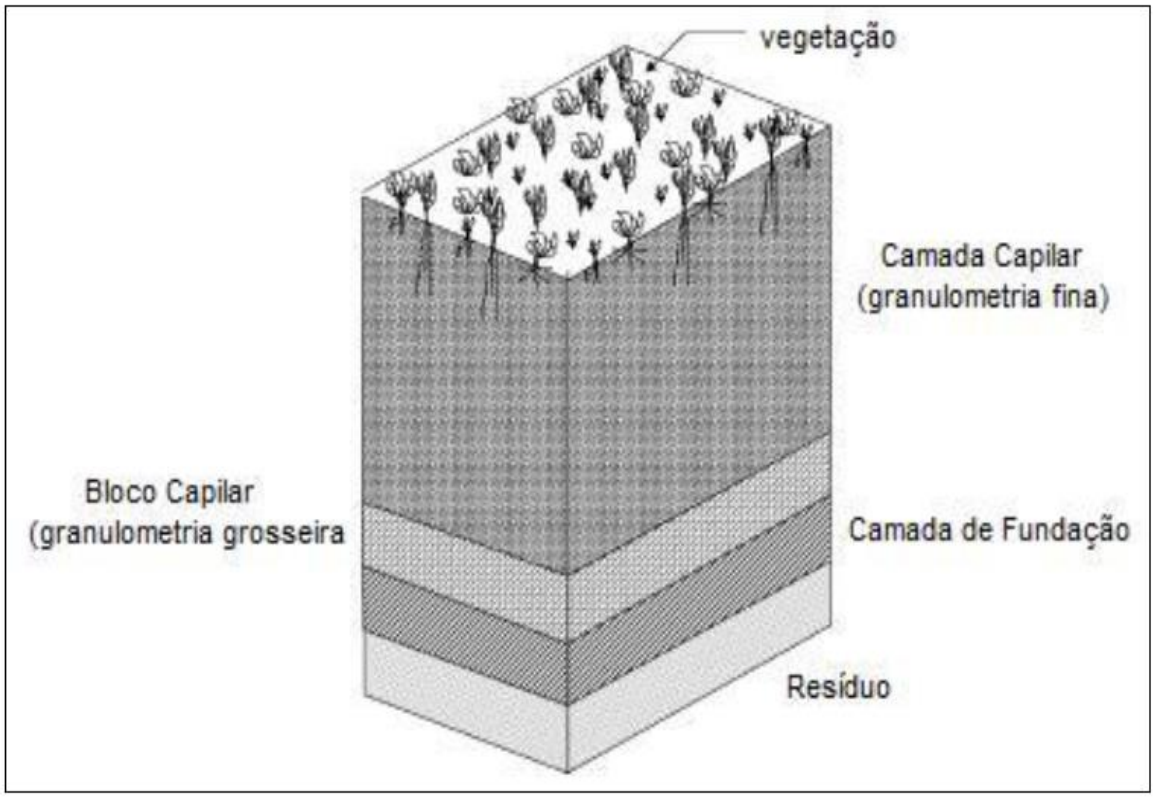

Figura 2.7 - Esquema de uma barreira capilar (adaptado de ZORNBERG & MCCARTNEY, 2007)

Segundo Hauser (2009), o sucesso da cobertura de barreira capilar está relacionado com a existência de mecanismo de remoção da água temporariamente armazenada para permitir espaço na capacidade de armazenamento para o próximo evento de chuva. A vegetação atua como este

mecanismo, o que explica a preferência em muitos casos de cobertura com superfície vegetada do que sem vegetação. Em coberturas evapotranspirativas com barreiras capilares, a camada de material com partículas maiores serve para aumentar a capacidade de armazenamento da camada de solo mais fino.

Na literatura encontram-se dois tipos de barreiras capilares: simples e dupla (KHIRE et al., 1999; KHIRE et al., 2000; CABRAL et al., 2007). O sistema de cobertura por barreira capilar simples é o caso de uma camada de solo de granulometria fina colocada sobre uma camada de material de granulometria grossa, como, areia ou cascalho, por exemplo. Na barreira dupla, na qual o efeito de quebra de capilaridade é duplicado, a camada de material granular superior exerce duas funções importantes: na época de seca ela impede que a água armazenada na camada de material fino migre por capilaridade para a camada de material granular e na época de chuva, essa camada funciona como um dreno, conduzindo lateralmente a água que infiltra na cobertura, prevenindo a saturação da camada de material fino (CABRAL et al., 2007). Esse tipo de barreira capilar pode ser particularmente interessante para boa parte dos climas das regiões brasileiras, que apresentam períodos de seca bem definidos no inverno e elevadas precipitações no verão (SOUZA et al., 2003).

Uma importante vantagem da barreira capilar é que a umidade armazenada dentro da camada de solo de textura fina pode exceder a sua capacidade de campo. Logo, a quantidade de água armazenada neste tipo de sistema de cobertura é superior àquela pelo sistema de cobertura de camada monolítica de equivalente espessura (ZORNBERG & MCCARTNEY, 2007). Para Madalinski et al. (2003), entretanto, quando a camada de solo de textura fina torna-se saturada, o efeito de barreira capilar pode tornar-se nulo, resultando na infiltração da água através da camada mais permeável em direção à camada de resíduos. Por isso, monitorar a umidade do solo é especialmente importante em projetos de barreiras capilares.

Segundo Ubaldo et al. (2007), o dimensionamento do tipo de cobertura barreira capilar é geralmente realizado com base no balanço hídrico, onde uma maior atenção deve ser dada ao fluxo evaporativo do solo, por se tratar de um

processo difícil de quantificar, que depende tanto das propriedades do solo quanto das condições climáticas.

Vários trabalhos comprovaram o desempenho da barreira capilar. Ubaldo (2005) estudou o desempenho de coberturas para aterros de resíduos sólidos de mineração. Em seus estudos, a autora testou diferentes materiais (areia, argila e resíduo denominado cinza de fundo) conjuntamente, quanto ao processo de evaporação e comparou com as simulações realizadas no programa “Soil Cover”. Os resultados das simulações mostraram um bom desempenho da barreira capilar com o uso da cinza de fundo.

Cabral et al. (2007) avaliaram o desempenho de uma barreira capilar dupla em um aterro de resíduos em Quebec. A composição da barreira capilar foi: 0,20m de brita, coberta com uma camada de 0,40m de areia; em seguida, uma camada de 0,60m de um subproduto da indústria de celulose; a cobertura contou ainda com uma camada protetora de 0,60m na superfície. Concluíram que a taxa de infiltração obtida foi de $4,7x10^{-10}$ $m.s^{-1}$, bem menor que a K_{sat} usualmente requerida para coberturas convencionais (10^{-9} $m.s^{-1}$).

Para Morris & Stormont (1997), barreiras capilares não são eficientes em condições climáticas de moderada a elevadas precipitações, sendo indicadas para ambientes áridos e semi-áridos. Segundo Benson & Khire (1995), estudos de campo têm mostrado que barreiras capilares com duas camadas são efetivas em regiões áridas e semi-áridas. Silva (2011) estudou o desempenho de barreiras capilares e camadas monolíticas em período de baixa pluviosidade, concluindo que a barreira capilar apresentou uma eficácia superior à camada convencional. Entretanto, alguns trabalhos reportam a inferioridade de desempenho da barreira capilar em relação à cobertura convencional em condições climáticas de alta pluviosidade (RIBEIRO et al. 2010; LOPES, 2011).

Ribeiro et al. (2010) construíram duas células experimentais em áreas de rejeitos de mineração, sobre lisímetros para coleta da água infiltrada. A primeira, do tipo convencional, foi composta por 0,50m de solo argiloso compactado, sobreposta por uma camada de 0,50m de solo siltoso. A segunda, do tipo barreira capilar, foi composta por uma camada de 0,50m de brita

sobreposta por uma camada de 0,50m de solo siltoso. Após dois anos de monitoramento e através de simulação numérica, concluíram que, para o clima local e para o propósito pretendido, a cobertura do tipo convencional apresentou-se mais adequada do que a barreira capilar porque, segundo os autores, a cobertura convencional permaneceu a maior parte do tempo próximo à saturação, o que é importante para evitar a migração de oxigênio através da cobertura.

Lopes (2011) avaliou a infiltração de água em três diferentes camadas de cobertura (metanotrófica, barreira capilar e convencional), instaladas em uma célula experimental de aterro de resíduos sólidos em Pernambuco. Através de ensaios de laboratório para caracterização dos materiais, investigação em campo, com medição de infiltração, temperatura e umidade em profundidade das camadas de cobertura, concluiu que as camadas do tipo metanotrófica (aquelas que atuam como minimizadoras de emissão de CH4 através de reação de oxidação ao longo do perfil do solo, através da presença de composto orgânico, proveniente da compostagem de matéria orgânica presente no lixo) e a barreira capilar apresentaram maior taxa de infiltração do que a camada convencional.

Para Koerner & Daniel (1997), em regiões de clima árido e semi-árido, as coberturas finais devem possuir configurações e especificações de solos diferentes das coberturas convencionais construídas em aterros de regiões de clima úmido. Por outro lado, projetos mais complexos com mais de duas camadas têm funcionado bem em regiões úmidas.

Triane (2010) comparou, através de simulação numérica, o desempenho entre uma barreira capilar dupla sobre áreas de rejeitos de carvão e o caso sem cobertura. 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, tanto em período seco quanto no úmido.

,

2.4.2.3 Coberturas evapotranspirativas

As coberturas alternativas do tipo evapotranspirativas utilizam uma camada de solo com teor de matéria orgânica apropriado para o plantio de uma cobertura vegetal, sobreposta a uma camada de solo pouco compactado que, durante o período de chuvas, vai, progressivamente, saturando sem, entretanto, permitir que uma quantidade significativa de líquidos alcance a sua base (ZORNBERG & MCCARTNEY, 2007). Assim que precipitação cessa ou diminui, a evapotranspiração passa a predominar e, progressivamente, vai secando e diminuindo a saturação da camada, até que o próximo período chuvoso recomece e os processos de armazenamento e secagem dessa camada se repitam. Portanto, nesse caso, a camada de solo ao invés de "impedir" a passagem de liquido, funciona como uma "caixa de água" que enche durante os períodos chuvosos e esvazia durante os períodos de estiagem (ZORNBERG & MCCARTNEY, 2007; CABRAL et al., 2007).

Coberturas do tipo evapotranspirativas, funcionam através da capacidade de armazenamento da camada, além da ação da vegetação em promover a evapotranspiração (Peng & Jiang, 2009). Segundo Benson (2001), quando o armazenamento hídrico (S) excede a capacidade de armazenamento da cobertura (S_c), ocorre a infiltração. Por isso os projetos têm como objetivo ajustar a capacidade de armazenamento da cobertura até que a taxa de infiltração esteja em um nível aceitável. Esta capacidade varia em função da espessura da camada de solo de textura fina usada para armazenamento hídrico.

Segundo Hauser (2009), as coberturas evapotranspirativas são coberturas alternativas que utilizam configurações naturais, sem emprego de barreiras resistivas e incluem uma camada vegetada por plantas nativas. Controlam a infiltração através do estabelecimento de um reservatório natural, pela evaporação do solo e pela transpiração das plantas, que atuam esvaziando este reservatório. Possuem a vantagem de apresentar custo baixo, praticidade, facilidade de manutenção e auto-renovação de sistemas biológicos, além de permanência efetiva por extensos períodos.

Ainda segundo o autor, existe uma diferença entre uma cobertura evapotranspirativa e uma cobertura vegetada, que reside no fato de que a primeira requer a otimização das propriedades dos componentes solo e vegetação, enquanto a segunda, ao contrário, não requer, utiliza barreiras de solo compactado, elevando a densidade do solo, altamente contraindicado ao desenvolvimento das plantas empregadas nas coberturas evapotranspirativas.

Abichou et al (2005) compararam o desempenho de coberturas alternativas e convencionais em local de clima úmido (1300m/ano), construídas em células experimentais. Os resultados da medição da percolação basal mostraram que na cobertura convencional foi maior, portanto o desempenho da cobertura alternativa foi superior.

2.4.3 Avaliação de desempenho de camadas de cobertura

Segundo Peng & Jiang (2009), para avaliação de desempenho de coberturas, devem ser conduzidos ensaios em campo e em laboratório com o material empregado, incluindo análise granulométrica, curva de retenção e condutividade hidráulica saturada. Analises numéricas quantitativas são necessárias para avaliar em escala piloto antes da adoção do projeto e construção em larga escala. Após a construção, um monitoramento de no mínimo um ano em campo deve ser realizado, para gerar dados que possam ser utilizados na calibração de modelos que levem em conta uma avaliação de longo prazo.

Para Benson & Bareither (2010), as seguintes etapas devem ser seguidas para avaliar um sistema de coberturas de balanço hídrico (isto é, coberturas alternativas):

- avaliação preliminar (determinar o desempenho requerido), caracterização do local (solo e vegetação disponíveis para o balanço hídrico);

- avaliação do armazenamento hídrico (determinar a espessura requerida da cobertura para poder armazenar água);

- modelar o balanço hídrico (fazer a previsão de desempenho através de análise numérica)
- realizar uma demonstração de performance (em escala de teste, para validar o resultado).

Um critério proposto para aterros de disposição de resíduos como aceitável para um mínimo de percolação basal, segundo Hauser (2009), é a média da taxa anual de percolação basal não exceder a 3% da precipitação anual. Este critério foi baseado em medições em campo de um grande número de localidades. De acordo com Melchior (1997), baseado nas condições específicas locais e estudos ao longo do tempo, um parâmetro chamado de "QPC (quantitative percolation criterium – critério quantitativo de infiltração)" foi levado em consideração para projetos de coberturas alternativas, sendo o valor de 1,3 mm/ano adotado como referência.

A ACAP (Alternative Cover Assessment Program) sugere que uma camada de cobertura alternativa do tipo evapotranspirativa, por exemplo, tem desempenho equivalente a uma cobertura de solo convencional se a taxa de infiltração é menor que 10 mm/ano em climas secos ou 30 mm/ano em climas úmidos. Para barreiras com solo e geossintéticos, o critério de equivalência é de 3 mm/ano, independentemente do clima (BENSON, 2000).

Segundo Benson et al. (2001), uma demonstração de equivalência de desempenho (à cobertura convencional) é geralmente requerida para uma cobertura alternativa. Esta demonstração pode comparar a infiltração na cobertura alternativa a um critério predefinido de equivalência estabelecido por órgãos regulamentadores. Alternativamente, uma comparação pode ser realizada entre taxas de infiltração de coberturas monolíticas e alternativas debaixo de condições meteorológicas idênticas. Em alguns casos, a demonstração de campo pode consistir de simulações em parcelas de campo lado a lado (alternativa e convencional).

2.4.3.1 Métodos de avaliação de desempenho de coberturas

Benson et al. (2001) realizaram um estudo sobre métodos que podem ser utilizados em estudos de avaliação de desempenho de cobertura e sugerem os seguintes:

- método do balanço hídrico;
- inferências baseadas no monitoramento da umidade e do potencial do solo;
- traçadores;
- lisimetria.

Nos itens 2.4.3.1.1 a 2.4.3.1.4 são apresentados alguns pontos importantes do trabalho realizado pelos autores. Os autores abordaram a questão da precisão e acurácia do resultado que pode ser alcançado pelo uso de cada método.

2.4.3.1.1 Método do balanço hídrico

O método do balanço hídrico consiste em medir ou estimar todas as variáveis no balanço hídrico e então usar o balanço de massa apropriado para calcular a taxa de infiltração, que é:

$$P_r = P - ET - R - \Delta S \qquad (9)$$

onde P_r é a taxa de infiltração ($mm.h^{-1}$), P é a precipitação (mm), R é o escoamento superficial (mm), ET é evapotranspiração (mm) e ΔS é a mudança no armazenamento hídrico durante um período fixo .

A precisão com o qual cada uma das variáveis do lado direito da equação 9 pode ser medida afeta diretamente a precisão com o qual a taxa de infiltração pode ser determinada.

O Quadro 2.2 apresenta um resumo dos pontos relevantes relacionados à medição das variáveis do balanço hídrico abordados pelos autores.

Quadro 2.2 – Pontos relevantes relacionados à medição das variáveis de balanço hídrico segundo Benson et al. (2001)

Variável	**Métodos de medição citados**	**Precisão normal**	**Fatores que podem afetar a medição**	**Observações relevantes**
Precipitação	-Pluviômetro	10%	-Localização -Método -Variabilidade espacial -Tipo de precipitação -Velocidade do vento	-Medições realizadas na cobertura na seção de teste melhoram a precisão e acurácia; -Erros da ordem de 30% podem ocorrer se velocidades de vento >8m/s. Protetores de ventos inadequados podem subestimar as medidas de precipitação em 50% ou mais
Evapotranspira-ção	-Medidas do fluxo de calor latente usando métodos micrometeorológicos; -Fórmulas empíricas; -Métodos numéricos	10 a 20%	--	-Dados necessários para estimar a evapotranspiração atual com métodos micrometeorológicos são raros ou inexistentes -Erros associados com métodos empíricos podem ser grandes
Escoamento superficial	-Métodos semi-empíricos -Técnica da capacidade de infiltração	2 a 3%	-Rugosidade	-A drenagem da área de influência não deve ser impedida pelo sistema de medição. Do contrário, a infiltração dentro da cobertura não será real
Variação do armazenamento hídrico	Técnicas nucleares e dielétricas (medição da umidade do solo)	2%	--	A calibração pode resultar em erros de umidade do solo da ordem de 5%

Os autores concluíram que, em alguns casos, a avaliação de desempenho pelo método do balanço hídrico tem precisão insuficiente para demonstrar que uma camada de cobertura alcança a infiltração requerida.

2.4.3.1.2 Inferências baseadas no monitoramento da umidade e do potencial do solo

Monitorar a umidade do solo e o potencial da água no solo é frequentemente sugerido como o melhor método para avaliar o desempenho de uma camada de cobertura. Inferências em relação ao desempenho de uma cobertura de solo podem ser feitas por:

(i) avaliação de tendências de dados

(ii) cálculo de fluxos usando dados de monitoramento e estimativas da condutividade hidráulica.

Em relação à inferência por meio de uma análise de tendências, os autores destacam que a ausência de uma tendência ou variação a uma dada profundidade tem sido incorretamente assumida para se ter que o fluxo não está ocorrendo e que não há infiltração da base da cobertura. Esta inferência está incorreta porque o fluxo da água ocorre devido ao gradiente de potencial total (que compreende o potencial de pressão e o gravitacional) ao invés de gradiente de umidade do solo. Além disso, o fluxo da água pode também ser na forma de vapor como resultado do gradiente de pressão de vapor e temperatura, podendo ocorrer até mesmo se a umidade for constante em diferentes profundidades.

Por exemplo, considerando uma camada monolítica de 1,5m de espessura de solo vegetado com grama. Os dados coletados por sensores dentro da cobertura indicaram que a umidade tem permanecido inalterada durante todo o tempo a profundidades maiores que 0,6m e que a umidade é essencialmente a mesma em todos os pontos monitorados abaixo de 0,6 m. Esta condição corresponde ao fluxo dirigido pela gravidade (gradiente

hidráulico unitário) no solo a profundidades maiores que 0,6m, e portanto, a taxa de infiltração igual a condutividade hidráulica do solo à umidade existente

Com relação ao cálculo da taxa de infiltração, o mesmo pode ser realizado a partir de dados de umidade usando a lei de Darcy se as propriedades hidráulicas da cobertura são conhecidas (SWCC e condutividade hidráulica do solo). Esta abordagem, referida aqui como método da lei de Darcy é para a taxa de infiltração (P_r) como sendo:

$$P_r = K(\psi) \times i \qquad (10)$$

Onde K (ψ) é a condutividade hidráulica correspondente à uma dada sucção e i é o gradiente hidráulico, o qual é calculado com sucções (ψ) correspondentes a valores de umidade obtidos e a elevações na qual a umidade é obtida.

Pelo método, o perfil de umidade é convertido em perfil de potencial total (h, h = z- ψ), utilizando sucções determinadas na curva característica da água no solo. O gradiente hidráulico (i) é a declividade do perfil de potencial total. A condutividade hidráulica é estimada a partir da sucção média nas profundidades onde o gradiente é calculado. O valor P_r é pertinente somente ao tempo na qual a água é coletada. Cálculos similares são realizados diária ou semanalmente para definir a característica temporal de P_r.

O método da lei de Darcy tem várias limitações que podem conferir erros no cálculo da taxa de infiltração. Talvez a maior fonte de erro é devido ao fluxo preferencial através de características macroscópicas do solo, fluxo lateral devido a pequenas variações de textura ou ainda, anisotropia em propriedades hidráulicas. Concernente ao fluxo preferencial, a maioria dos sensores utilizados para medir umidade e sucção mátrica (como TDR ou dispositivos de dissipação de calor) produzem dados relativos às condições no interior da matriz do solo, não relativos a rachaduras, fissuras ou macroporos que conduzem fluxo preferencial. Até mesmo se os sensores puderem detectá-lo,

instalar os sensores ao longo do caminho do fluxo preferencial é impossível, pois não se pode conhecer “a priori” aonde eles estão. Por outro lado, se o fluxo preferencial é ignorado, a precisão do método da Lei de Darcy pode ser avaliada pela precisão com o qual ψ e K (ψ) pode ser estimado (erros em ψ devido à histerese pode ser tão grande quanto os erros de K (ψ)). A maioria dos cálculos feitos utilizando o método da lei de Darcy emprega uma única curva de SWCC (geralmente a curva de secagem) e ignoram a histerese. Erros em K (ψ) tem um efeito considerável na estimativa da taxa da infiltração. Quando estimada a partir da condutividade hidráulica do meio saturado e pela curva de retenção baseado no modelo de van Genuchten (1980), produz estimativas razoáveis para solos de textura mais grossa, mas pode subestimar para solos de textura fina (FREDLUND et al., 1994). Este erro pode ser evitado através do monitoramento de sucções na mesma profundidade no qual a umidade está sendo medida. Portanto, estimativas da taxa de infiltração usando o método da Lei de Darcy tem uma precisão de uma ou duas ordens de magnitude. Esta precisão relativamente pobre pode ser aceitável se a taxa de infiltração é muito baixa ($1x10^{-4}$ mm/ano), mas é inaceitável se a taxa de infiltração calculada é estritamente equivalente à taxa de infiltração obtida em campo.

Uma mais profunda abordagem para estimar a taxa de infiltração a partir de dados de umidade é a equação de Richards, usando modelagem numérica. Tanto a SWCC como a condutividade hidráulica do solo não saturado são necessários neste caso, assim como dados detalhados das condições de contorno (condições meteorológicas e evapotranspiração).

2.4.3.1.3 Traçadores

Pelo método, no solo perto da superfície, um soluto conservativo normalmente não achado na água presente nos poros do solo local, é introduzido. Trincheiras são posteriormente escavadas várias vezes durante o período de monitoramento e amostras coletadas a várias profundidades submetidas a análises químicas. A infiltração ocorre somente se o traçador for

detectado. Pode ser sugerido como um meio de demonstrar que a taxa de infiltração de uma camada de cobertura não ocorre abaixo de uma dada profundidade. A precisão deste método depende da concentração do soluto aplicado, a quantidade de soluto absorvido pelas raízes das plantas, o limite de detecção nas análises químicas, a quantidade de água que flui durante o período analisado, a presença de fluxo preferencial e a qualidade do balanço de massa alcançada. Pelo número de fatores que podem afetar a precisão desta técnica e a experiência limitada com ela, a avaliação quantitativa de precisão na maioria das vezes não é possível.

2.4.3.1.4. Lisimetria

No contexto da avaliação de desempenho, a lisimetria é o uso de recipientes com abertura no topo para coletar e medir a água do solo. Diferentemente dos métodos indiretos mencionados, o lisímetro produz uma medida direta da taxa de infiltração. Segundo os autores, há dois tipos: de pesagem e volumétricos. O lisímetro de pesagem emprega uma escala de medida relacionada ao peso total do solo dentro da área monitorada e uma tubulação de drenagem para coleta do percolado da base do perfil da camada de cobertura. Mudanças de peso registrado na escala representam mudanças no armazenamento hídrico (somente mudanças significantes são tidas como devido a mudanças no armazenamento hídrico). Lisímetros de pesagem são limitados a secções de teste menores (1 a 2 m^2) por causa da capacidade limitada de escala. Já o lisímetro volumétrico, consiste de um recipiente para coletar a água infiltrada da base do perfil que está sendo monitorado.

Os lisímetros volumétricos são empregados quando um monitoramento menos custoso é desejado ou uma secção grande esta sendo monitorada. A principal vantagem do lisímetro é a obtenção de medições diretas. As taxas de infiltração podem ser medidas com uma precisão de 0,5 mm/ano ou menos. Para obter dados precisos de mudanças no armazenamento hídrico do solo, podem ser empregados os lisímetros de pesagem.

A desvantagem mais significativa do lisímetro é a condição artificial de fluxo induzido na base do lisímetro. Esta condição de contorno, inexistente naturalmente no cenário de campo impede o fluxo ascendente de vapor ou descendente de líquido através da base do lisímetro, ou seja, o lisímetro interfere nas condições normais de fluxo. Toda água que migra verticalmente da base do perfil é coletada e encaminhada para fora do sistema. Logo, a água coletada nunca se moverá ascendentemente em função de gradientes naturais induzidos pela diferença de evapotranspiração e de temperatura.

A maioria dos lisímetros também inclui uma camada de drenagem (solo ou geossintético) para direcionar a infiltração para o ponto de medição. Como resultado, um aumento na capacidade de armazenamento do perfil de cobertura pode ocorrer devido a condições naturais, ou como redução artificial na taxa de infiltração. Este caso só é problemático se a camada de drenagem tem poros muito diferentes do que o material sobre o qual a camada de cobertura está sendo instalada, ou se a cobertura é pouco espessa (< 1m).

2.4.3.2 Outras abordagens sobre avaliação de desempenho de sistemas de coberturas

2.4.3.2.1 Dificuldades de medição da infiltração com lisímetros

Algumas pesquisas foram realizadas sobre as dimensões mais apropriadas para os lisímetros em estudos de camadas de cobertura (O´KANE & BARBOUR, 2003; PARENT et al., 2006), sendo obtido que a dimensão lateral (altura da parede) dos lisímetros é função da condutividade hidráulica dos materiais utilizados. Se não forem particularmente configurados para cada caso, considerando as propriedades dos materiais envolvidos, condições de fluxo prováveis e dimensões físicas, os dados obtidos provavelmente não serão adequados. Eficiência de captação de menos de 10% tem sido observado para estes lisímetros (ZHU et al., 2002) devido a desvios laterais ou fluxo “by-pass” (que não é coletado pelo lisímetro). Desvios laterais pode ser um problema mais significativo se as dimensões do lisímetro são insuficientes e se o

lisímetro não possui parede lateral (BEWS et al., 1999). Lisímetros muito pequenos ou estreitos coletam menos água e subestimam a taxa de infiltração.

Como o lisímetro é enterrado a determinadas profundidades de interesse, não é possível visualizar seu desempenho, cuja interpretação depende inteiramente do correto entendimento do processo envolvido e dos fatores que controlam o fluxo. Segundo Parent et al. (2006), a confiabilidade do lisímetro pode ser comprovada pela comparação com dados de sucção obtidos por tensiômetros. Ainda segundo os autores, baseando-se no método linear e adotando uma taxa de $5x10^{-9}$ $m.s^{-1}$, podem ser realizadas simulações numéricas para avaliar o desempenho dos lisímetro instalados nas camadas da barreira capilar, usando um software de elementos finitos.

Cabral et al (2007), em estudos de barreiras capilares, uilizando lisímetros de 0,60m (enterrado na camada de areia) e 0,20m (enterrado na camada de brita), monitorou as condições de contorno dos lisímetros através de pares de tensiômetros, um colocado exatamente sobre o topo do lisímetro e outro fora do lisímetro, porém na mesma elevação. As leituras idênticas de sucção indicaram que não havia gradiente lateral, e, portanto, os lisímetros estavam coletando adequadamente a água infiltrada.

2.4.3.2.2 Demonstrações de campo

Para Benson et al. (2001), demonstrações de campo devem ser feitas para verificar o desempenho de camadas de cobertura. Simulações de campo comparando tipos de camadas com as camadas convencionais monolíticas podem ser utilizadas. Neste sentido, diversos trabalhos em campo foram realizados para avaliar o desempenho de camadas de cobertura. O Quadro 2.3 fornece alguns exemplos de trabalhos que utilizaram demonstrações de campo.

Quadro 2.3 – Exemplos de trabalhos que utilizaram demonstrações de campo em avaliação de sistemas de cobertura

Autor(es)	**Tipo de cobertura avaliada**	**Metodologia utilizada**
Abichou et al (2005)	Alternativa (evapotranspirativa) vs convencional	Monitoramento de células experimentais em lisímetros 10 x 20m
Barnswell & Dwyer (2011)	Alternativa (evapotranspirativa)	Monitoramento de células experimentais em lisímetros 1,52 x 1,52m
Shnabel et al. (2012)	Alternativa (evapotranspirativa) vs convencional	Monitoramento de células experimentais em lisímetros 10 x 20m
Albright et al (2006)	Convencional	Monitoramento de células experimentais em lisímetros 10 x 20m
Cabral et al (2007)	Alternativa (barreira capilar)	Monitoramento de células experimentais e Uso de lisímetros

2.4.4 Simulação numérica para avaliação de desempenho de coberturas

Segundo Peng & Jiang (2009), a avaliação in situ permite uma medição direta de parâmetros relacionados ao desempenho de sistemas de cobertura. Entretanto, esta avaliação pode ficar muito restrita a localidades ou até mesmo a pontos, não possibilitando uma avaliação mais ampla e de longo prazo. Portanto, para melhor entendimento do fluxo não saturado em dado sistema de

cobertura e para previsões de desempenho no longo prazo, análise numérica é necessária.

Vários trabalhos são encontrados na literatura que empregaram simulação numérica para avaliar o desempenho de sistemas de cobertura (KHIRE et al., 1999; KHIRE et al., 2000; UBALDO, 2005; ORGOZALEK et al, 2008; SANTOS et al., 2009; BIZARRETA & CAMPOS, 2011; MIJARES & KHIRE, 2012; NG et al., 2015)

Silva & Von Sperling (2011) em estudo comparativo entre a simulação física e numérica do comportamento hidráulico de um exemplar de barreira capilar, chegaram à comprovação de que o modelo numérico é capaz de estimar tanto a quantidade de água drenada, como o comportamento hidráulico deste ambiente ante o fenômeno de redistribuição da água. Ainda segundo os autores, uma análise detalhada da eficiência das barreiras capilares sob condições naturais é tarefa difícil e muito dispendiosa. A avaliação da sua eficácia pode levar anos ou até mesmo décadas.

Para condução da simulação numérica do desempenho de sistemas de cobertura, alguns parâmetros “input” são requeridos, como os climáticos, hidráulicos e de vegetação.

De acordo com Peng & Jiang (2009) os cinco programas mais utilizados são: HELP (2D), UNSATH (1D), HYDRUS (2D), SoilCover (1D) e Vadose/W (2D).

A avaliação de desempenho foi realizada através de:

(i) Monitoramento em campo da umidade e temperatura do solo empregado na cobertura e medidas de infiltração;

(ii) ensaios de campo e observações visuais;

(iii) e ensaios de laboratório;

(iv) simulação numérica.

A parte experimental do presente trabalho pode ser dividida em três períodos:

(i) uma etapa preliminar (piloto), que compreendeu um período de 3 meses chuvosos (dezembro de 2012 a fevereiro de 2013);

(ii) a etapa principal de um ano de monitoramento (agosto de 2013 a agosto de 2014);

(iii) uma etapa complementar, durante nova estação chuvosa (dezembro a abril de 2015).

O monitoramento do desempenho das coberturas contou com aparato instrumental composto por um conjunto de sensores para obter perfis de umidade e temperatura, tensiômetros para medir a sucção (todos instalados em duas profundidades) e lisímetros.

Para caracterizar o solo empregado nas coberturas e dar suporte aos resultados obtidos, os seguintes ensaios de laboratório foram realizados: caracterização geotécnica (granulometria, porosidade, massa específica, compactação); determinação da condutividade hidráulica do solo saturado; determinação da curva de retenção da água no solo. Adicionalmente, o trabalho contou ainda com os seguintes ensaios de campo: determinação de condutividade hidráulica do solo saturado e determinação da massa específica do solo *in situ*.

3.2 Descrição do aterro sanitário CTR Seropédica

O aterro sanitário da Central de Tratamento de Resíduos (CTR) Seropédica (Figura 3.2)– foi o aterro escolhido para realização da pesquisa. Este aterro sanitário de operação privada está localizado no Estado do Rio de Janeiro, no município de Seropédica, no bairro Santa Rosa, com coordenadas geográficas S 22º47’13.27’’ e W 43º45’44.92’’(local do experimento), cobrindo uma área de cerca de 2.226.000 m² de extensão total.O centro urbano do município de Seropédica está a aproximadamente 10km de distância da área (CICLUS, 2015).

A escolha deste aterro se deu principalmente em função de ser um aterro novo e pela importância que assumiu ao passar a receber resíduos do município do Rio de Janeiro. Além disso, a empresa Ciclus, que gerencia o aterro, forneceu importante apoio na instalação e manutenção do experimento.

A CTR Seropédica consiste num sistema de disposição de resíduos sólidos urbanos de Classe II, conforme classificação definida pela ABNT 10.004 (ABNT, 2004). O projeto da CTR é composto por aterro sanitário bioenergético, estação de tratamento de lixiviado para transformação em água de reúso e Centro de Educação Ambiental, além da estação de captação e tratamento de biogás para geração de energia limpa.

Este aterro teve suas operações iniciadas em 19 de Abril de 2011, tendo recebido todas as licenças ambientais necessárias para sua operação. Atualmente recebe resíduos dos municípios de Seropédica, Itaguaí e Rio de Janeiro, perfazendo um quantitativo de cerca de 14 mil toneladas/dia de resíduos sólidos (CICLUS, informação verbal).

O local dentro do sub-aterro 1 onde foi construídoo experimento trata-se de uma área temporariamente inativa do aterro, com altura de resíduos na cota aproximada de 70,0 m. A altura final do aterro está prevista para ser na cota de 125,00m (CICLUS, informação verbal).

3.3 Descrição do local de estudo

As informações dos dados climáticos e do meio físico apresentadas neste item foram obtidas a partir do Estudo de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) apresentados ao órgão ambiental do Rio de Janeiro (VEREDA, 2009), ou fornecidos diretamente pela empresa Ciclus, que gerencia o aterro.

3.3.1 Dados climáticos

O clima predominante na região é tropical constantemente úmido, e segundo a classificação de Köppen, do tipo Aw (Köppen, 1948). Para este trabalho, apenas os dados pluviométricos foram obtidos no local do experimento. Os demais dados necessários (temperaturas mínima e máxima do ar, velocidade do vento, umidade relativa) foram obtidos da estação meteorológica Ecologia Agrícola do INMET, também sediada em Seropédica,localizada a aproximadamente 8,5 km do aterro (Figura 3.5).

3.3.1.4 Evaporação e balanço hídrico

A evaporação anual varia de 1.010 a 1.690 mm.ano^{-1}.Em relação ao balanço hídrico,a região de Seropédica possui um balanço hídrico anual positivo de novembro a meados de março, com maior disponibilidade hídrica em janeiro. De abril a outubro, a região apresenta um balanço hídrico negativo com maior déficit hídrico sendo atingido no mês de agosto.

3.3.2 Dados do meio físico

O aterro está localizado dentro da bacia hidrográfica do Rio Guandu (Figura 3.8).

Em relação à geologia local, pode-se descrever, resumidamente, o perfil típico da área (do topo para a base):

- Camada de areia fina a média, pouco argilosa, com espessura máxima de 70cm. A forma de distribuição em área, textura e arranjo sugerem materiais inconsolidados (transportado);

- Camada de areia média, pouco argilosa a argilosa, com espessura variando de 20cm a 2,20m. As características dos grãos e forma do depósito sugerem origem aluvionar, possivelmente correlacionada à fácies inferior da Formação Piranema;

- Material residual – alteração de rocha. Este é composto por areia média e grossa com presença de argila (argilo-arenosos). Nota-se variações na coloração, presença de estrutura da rocha original (gnaisse) e de cristais por vezes grosseiros de quartzo e feldspato angulares. (Espessura de 40cm a 8m).

Na região está inserida a formação Piranema que dá origem a um aquífero. A baía de Sepetiba está relativamente próxima à região.

Em relação à topografia, caracteriza-se predominantemente plana, destacando-se a presença de duas colinas isoladas com, respectivamente, 70 e 120m de altitude e declividades médias. A jazida de empréstimo está

Quadro 3.1 – Configuração experimental e distribuição dos instrumentos utilizados no monitoramento durante as três etapas experimentais

<table>
<tr><td colspan="4">Etapa: preliminar</td></tr>
<tr><td colspan="2"><u>Cobertura convencional</u>

3 repetições de conjuntos de sensores instalados nas profundidades: 0,20m e 0,40m

1 lisímetro</td><td colspan="2"><u>Barreira capilar</u>

3 repetições de conjuntos de sensores instalados nas profundidades: 0,20m, 0,40m e 0,70m

1 lisímetro</td></tr>
<tr><td colspan="4">Etapa: principal</td></tr>
<tr><td><u>Célula C</u>

Cobertura Convencional

2 repetições de conjuntos de sensores instalados nas profundidades: 0,20m e 0,40m 1 lisímetro</td><td><u>Célula CV</u>

Cobertura Convencional vegetada

2 repetições de conjuntos de sensores instalados nas profundidades: 0,20m e 0,40m

1 lisímetro</td><td><u>Célula BC</u>

Cobertura Barreira capilar

2 repetições de conjuntos de sensores instalados nas profundidades: 0,20m, 0,40m e 0,70m

1 lisímetro</td><td><u>Célula REF</u>

Cobertura Convencional

2 repetições de conjuntos de sensores instalados nas profundidades: 0,20m e 0,40m

2 lisímetros

4 tensiômetros</td></tr>
<tr><td colspan="4">Etapa: complementar</td></tr>
<tr><td><u>Célula C</u>

Cobertura Convencional (solo A)

2 repetições de conjuntos de sensores instalados nas profundidades: 0,20m

02 lisímetros</td><td><u>Célula CV</u>

Cobertura Convencional vegetada

2 repetições de conjuntos de sensores instalados nas profundidades: 0,20m

1 lisímetro</td><td><u>Célula BC</u>

Cobertura Barreira capilar

2 repetições de conjuntos de sensores instalados nas profundidades: 0,20m

1 lisímetro</td><td><u>Célula C´</u>

Cobertura Convencional (solo B)

2 repetições de conjuntos de sensores instalados nas profunds: 0,20m

1 lisímetro</td></tr>
</table>

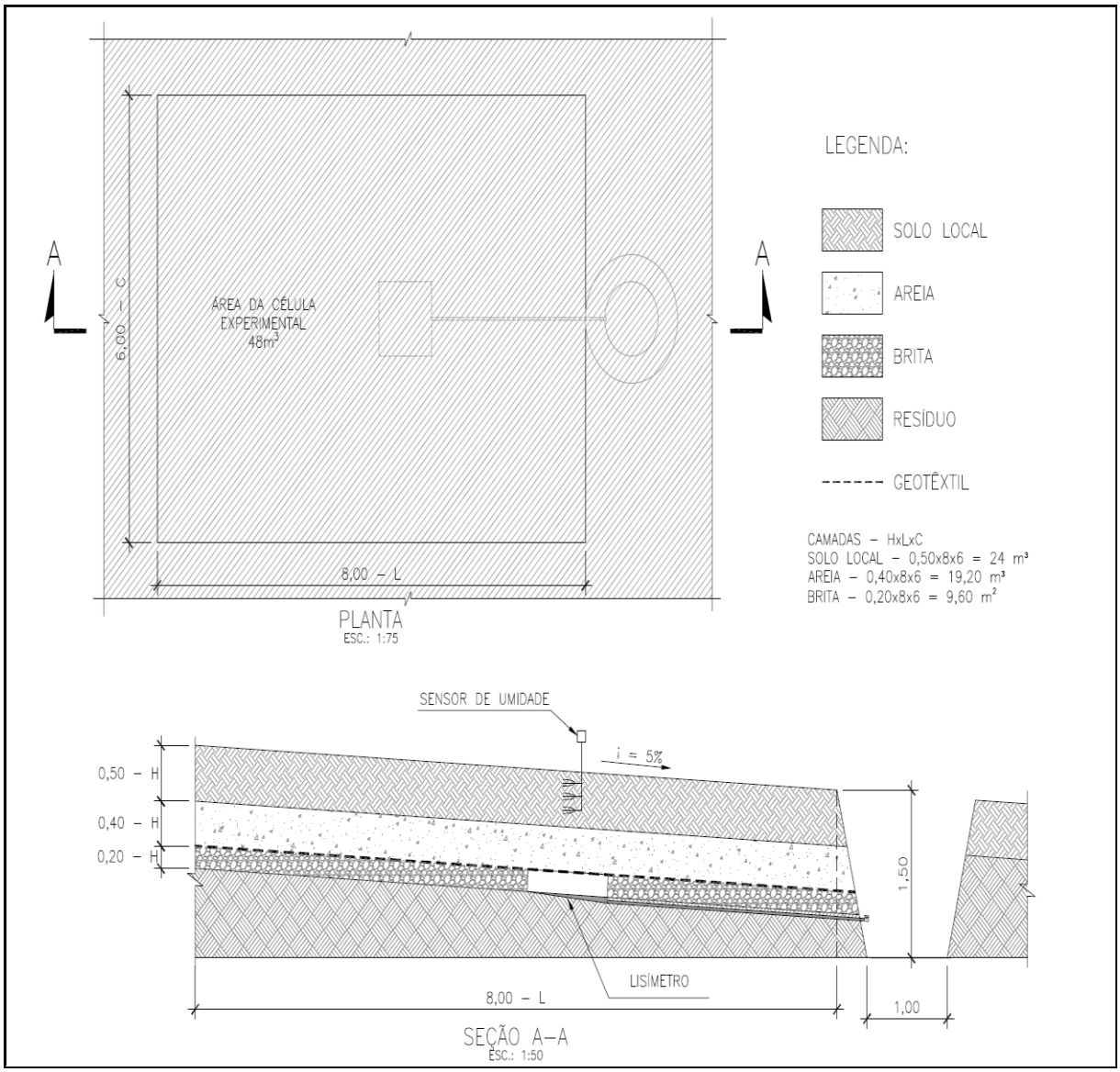

Figura 3.14: Projeto da barreira capilar dupla instalada

3.4.1.1 Construção das células experimentais

As células experimentais da etapa preliminar tiveram sua construção concretizada em dezembro de 2012.Ressalta-se que durante a construção das coberturas procedeu-se também a instalação da instrumentação utilizada para as determinações de campo.

Para a cobertura convencional, foi removida a cobertura existente até que o lixo ficou exposto. Em seguida, foi colocada uma nova cobertura com solo local, o mesmo utilizado na como camada de textura fina na barreira capilar.

de se obter a correlação entre os valores de umidade gerados pelo sensor e os valores de laboratório. A curva de calibração obtida encontra-se no Apêndice A.

Para a medição da infiltração, durante a fase preliminar, utilizaram-se nas duas células existentes até então, lisímetros fabricados manualmente, utilizando-se o fundo de uma caixa de água (Figura 3.22) conectado a um sistema de coleta. Foi utilizado um lisímetro em cada célula, posicionado na região central da mesma.

A confecção do lisímetro deu-se através do corte de uma caixa d´água de 1,0m de diâmetro, na altura de 0,20m de sua base. Essa dimensão do lisímetro foi com baseada em trabalhos na literatura como por exemplo, o de Cabral (2007), que estudou o desempenho de barreiras capilares em aterro de resíduos.

Cada lisímetro foi posicionado na base da camada e preenchido integralmente com o material que compõe a camada em que está localizado. Assim, na célula de camada convencional, o lisímetro foi preenchido com o material da camada única, o solo enquanto na célula da barreira capilar o lisímetrofoi preenchido com brita, pois ficou exatamente dentro desta camada (Figura3.23).

Durante a instalação, o sistema coletor foi testado através da introdução direta de água (Figura 3.24), tendo sido comprovada a sua funcionalidade. Para evitar entupimento da tubulação, a saída do lisímetro foi protegida com geotêxtil (Figura3.25).

tipos de configurações de camadas de cobertura enquanto que a quarta tratou-se de uma repetição de uma delas, conforme a seguir:

- Célula C – para avaliação do desempenho da camada final de cobertura utilizada pelo aterro - **convencional**;
- Célula BC– para avaliação do desempenho da primeira alternativa ao sistema de cobertura final utilizada pelo aterro, a camada do tipo **barreira capilar**;
- Célula CV–para avaliação do efeito de uma **camada** protetora **vegetada** na cobertura convencional;
- Célula REF –repetição da célulade cobertura convencional (C), sendo denominada (REF) porque foi construída para, nesta etapa, ter instrumentação diferenciada,e com isso ser uma **referência** em relação aos resultados de umidade de solo e de infiltração,tendocomo principal função, validar as medições utilizadas no monitoramento.

3.4.3 Configuração experimental e instrumentação da etapa complementar

Esta etapa, cujo objetivo foi de complementar o conjunto de dados, compreendeu o período de dezembro de 2014 a março de 2015, quatro meses de monitoramento dentro de nova estação chuvosa.

Devido às condições climáticas atípicas do ano de 2014 que resultou em baixo índice pluviométrico (Figura 3.5), escolheu-se fazer nova coleta de dados, aproveitando o início de nova estação chuvosa e a possibilidade de inclusão de novos equipamentos. Na etapa complementar foi possível contar com um sistema de aquisição automática de dados (*dataloggers*) para monitoramento contínuo. Desta forma, foi possível conhecer o comportamento da umidade.do solo em curtos intervalos de tempo e utiliizar estas informações para o cálculo da taxa de infiltração.

Foram utilizadas as mesmas células experimentais da etapa principal, com exceção da quarta célula, anteriormente denominada REF, a qual convencionou-se denominar, a partir de então, C', porque continuou a ser convencional e aproveitou-se a oportunidade de substituir o solo empregado da camada por um novo material (denominado solo "B"), visualmente distinto (vide figura 3.37), tido como um tipo de solo com melhor desempenho em camadas de cobertura. Uma informação obtida por responsáveis pelo gerenciamento (Ciclus, 2014), foi que os solos locais tem destinações distintas no aterro: o solo que compõe a célula C é geralmente empregado nas coberturas intermediárias, ou seja, é utilizado em maior proporção; o segundo solo, empregado na célula C', é destinado à camada de fundação ou como cobertura final.

Assim, o objetivo foi avaliar o efeito do tipo de solo no desempenho da cobertura convencional.

Diante de algumas dúvidas surgidas durante a etapa principal em relação à obtenção de dados de infiltração, devido a problemas no desempenho e operacionalização dos lisímetros, anteriormente instalados, inclusive os da célula REF, após o término da etapa principal foi tomada a

negativamente os resultados da medição. Apresenta em sua estrutura um componente de fibra de vidro especialmente tratado que aplica uma tensão da água na região onde se pretende extraí-la. Sem esta tensão, a água seria forçada a se mover ao redor do lisímetro ao invés de entrar dentro dele. Para água entrar em um lisímetro, o valor da sucção na sua entrada deve ser igual ou maior do que o valor da sucção ao seu redor (igual ou menor, se for em termos de potencial da água). Em um tradicional lisímetro de zero-tensão (como por exemplo: tipo “pan”), é provável que ocorra fluxo preferencial da água ao redor da entrada do lisímetro (fluxo divergente) a menos que as condições do solo sejam de saturação (sução próxima a zero). Por consequência, este tipo de lisímetro acaba por subestimar a medição. O lisímetro G3 Drain Gauge utiliza um componente de fibra de vidro (Figura 3.38) para formar uma coluna de água suspensa que imprime uma sucção na entrada do lisímetro, impedindo que ocorra o problema de fluxo preferencial ao redor do lisímetro.

O tubo de controle de divergência, como está localizado na porção superior do equipamento, tem também o propósito de manter o fluxo vertical acima do mesmo, minimizando a divergência e convergência de fluxo, de forma que seja interceptada uma amostra representativa da água, otimizando a eficiência de coleta. O lisímetro possui uma superfície de coleta de 0,0507 m^2 (25,4 cm de diâmetro interno), tendo capacidade de armazenamento de até 8,2L.

No interior do lisímetro é adicionada uma porção de um material denominado terra diatomácea (Figura 3.39b), a qual atua para garantir um bom contato hidráulico entre o solo no tubo de controle de divergência e o restantedo lisímetro, e também filtra partículas finas da água drenada, mantendo o equipamento livre de acumulação de solo.

3.5.2 Determinação da massa específica *in situ*

A fim de verificar a situação da compactação do solo nas células experimentais, foi realizado um ensaio de determinação da massa específica in situ para obtenção do grau de compactação. Este ensaio foi realizado após o término da etapa principal e incluiu as células C, CV, BC e C'.

A densidade foi determinada segundo a norma ABNT NBR 7185:1986 (Determinação da Massa Específica Aparente "in situ" com Emprego do Frasco de Areia).O ensaio baseia-se na escavação de um volume determinado no solo para preenchimento do mesmo com areia a partir de um frasco, conforme Figura 3.42 e demais aparatos de apoio. A massa específica do solo é dada por:

$$\rho_s = f_c \times \rho_a \times \frac{Mh}{M} \qquad (11)$$

Onde: ρ_s = massa específica aparente seca do solo "in situ", em g/cm^3;

f_c = fator de correção da umidade , $f_c = \frac{100}{100+h}$;

h = teor de umidade do solo extraído da cavidade do terreno, em %;

ρ_a = massa específica aparente da areia, em g/cm^3;

Mh = massa de solo extraído da cavidade do terreno, em g;

M = massa da areia que preencheu a cavidade do terreno, em g

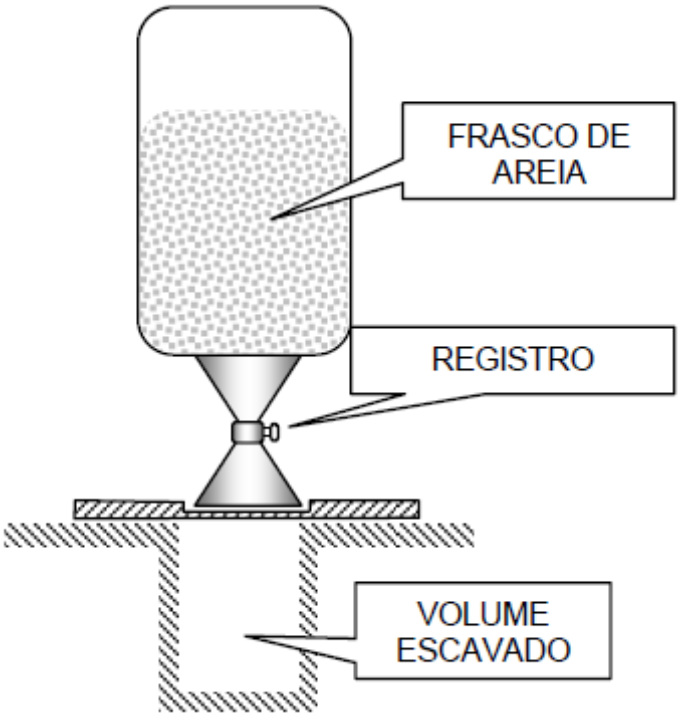

Figura 3.42: Esquema da utilização do frasco de areia para determinação da massa específica in situ do solo empregado nas células experimentais (ALMEIDA, 2005)

3.6 Ensaios de laboratório

O solo local é o principal material empregado na composição das camadas de cobertura e por isso foi objeto de ensaios de laboratório, tendo sido determinadas algumas características geotécnicas de interesse ao estudo. Adicionalmente foram realizados ensaios relacionados à determinação de parâmetros hidráulicos do solo.

3.6.1 Caracterização do solo

Com o objetivo de fazer a caracterização do solo empregado no aterro, os seguintes ensaios foram realizados: análise granulométrica, determinação da densidade real de grãos, do limite de liquidez, do limite de plasticidade e ensaio de compactação Proctor Normal.

Foram coletadas amostras deformadas e enviadas ao Laboratório de Mecânica de Solos da Faculdade de Engenharia da UERJ. A caracterização foi realizada a partir das normas padronizadas da ABNT:

- ABNT NBR 7181: 1984 –Solo – Análise Granulométrica (ABNT, 1984a);
- ABNT NBR 6459: 1984 - Solo – Determinação do Limite de Liquidez (ABNT, 1984c);
- ABNT NBR 7180: 1984 - Solo – Determinação do Limite de Plasticidade (ABNT, 1984d);
- ABNT NBR 7182: 1986 - Solo – Ensaio de Compactação (ABNT, 1986a);
- ABNT NBR 6457: 1986 - Amostra de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaios de Caracterização (ABNT, 1986b);

3.6.2 Determinação de parâmetros hidráulicos

Para a determinação de parâmetros hidráulicos em laboratório, foram coletadas amostras indeformadas em anéis cilíndricos metálicos (Figura 3.43), sendo seguidos os procedimentos necessários para sua obtenção e transporte.

Foram realizadas coletas basicamente em três momentos distintos: no início da etapa principal experimental (o período de um ano) um ano após o início da etapa principal e durante a etapa complementar, quando então a camada REF teve o seu solo substituído pelo segundo tipo de solo em estudo.

No primeiro momento, apenas uma amostra para cada tipo de cobertura foi retirada, da profundidade de 0,40m. Neste momento, levou-se em consideração a necessidade de obter-se informações dos parâmetros hidráulicos em profundidades maiores, próximo à base da camada.

Para melhorar a representatividade e confiabilidade dos dados, retirou-se uma quantidade maior de amostras no segundo e no terceiro momento (neste último, 9 amostras para cada célula experimental, agora levando em conta também o segundo tipo de solo). Para estes dois últimos, retirou-se

3.6.2.2Curva característica da água no solo

A fim de determinar a relação da sucção do solo com a sua umidade, foi realizado o ensaio de curva característica da água no solo. Para confirmara adequação das curvas, optou-se por realizar o ensaio por dois métodos: método do extrator de placa porosa e método do Papel Filtro (ASTM, 2010).

A comparação dos métodos foi realizada da seguinte forma: retirou-se 6 amostras indeformadas de solo, sendo 3 da cobertura C e 3 da cobertura BC. Procedeu-se à realização do ensaio de curva de retenção pelo Método do Papel Filtro (ASTM D5298:2010). Em seguida, as mesmas amostras foram submetidas a novo ensaio de curva de retenção, novamente pelo método do extrator de placa porosa.

O ajuste dos dados das curvas de retenção em ambos os casos foi feito utilizando-se o modelo proposto por van Genuchten (1980).

3.6.2.2.1 Método do extrator de placa porosa

Foi determinada para as mesmas amostras citadas no item 3.6.2.1, a curva de retenção da água no solo, pelo método de extrator de placa porosa. Este ensaio também foi realizado pelo Laboratório de Física do Solo, do Instituto Agronômico (IAC). As amostras foram saturadas em água e o excedente extraído pela aplicação depressão constante em Câmara de Richards (Figura 3.44).

• Camada de cobertura barreira capilar: composta pela camada de 50 cm solo local compactado sobreposto a uma camada de 40 cm de areia e 20 cm de brita;

• Camada de cobertura convencional vegetada: composta pela camada de 50 cm de solo local compactado coberto com grama.

Para a modelagem foi considerada uma coluna de 0,1m de largura e 1,0m de espessura, uma vez que os resultados obtidos podem ser aplicados em outras dimensões.

Considerou-se que o perfil encontrava-se com uma temperatura inicial de 30^{o}C.

O tempo considerado para análise não correspondeu ao período de uma ano da etapa inicial, devido a restrições do programa que requeriam que a condição inicial para o solo empregado não fosse de sucção elevada, o que da fato ocorreu no início da etapa principal. Desta forma, adotou-se um período de 266 dias compreendendo 30/11/2013 a 23/08/2014, cuja condição inicial foi de 10 kPa.

A Figura apresenta 3.46 apresenta a coluna de solo na qual o programa executou a simulação numérica.

• Índice de Área Foliar (LAI)

Este índice foi estimado baseando-se nos dados disponíveis na biblioteca do software.

• Profundidade das Raízes

Considerou-se que as raízes cresceram até atingir uma profundidade de 20 cm, conforme o comprimento das raízes da vegetação.

3.7.2 Dados de saída

Após a execução do programa foi possível obter simulações relacionadas ao balanço hídrico (runoff, evaporação, armazenamento hídrico, transpiração) e à infiltração da água na cobertura.

.

3.8 Comparação do desempenho entre os tipos de cobertura estudados

Comparar o desempenho é uma tarefa que pode ser realizada de uma forma mais eficaz se forem levados em consideração critérios objetivos. Desta forma, elaborou-se uma metodologia para realizar a comparação considerando critérios relacionados a fatores-chave comuns em projetos e monitoramento de sistemas de cobertura foram selecionados e analisados para comparar o desempenho das coberturas estudadas.

Para uma melhor combinação destes fatores no julgamento do atendimento a critérios pré-estabelecidos, optou-se por um sistema simples de pontuação em que uma nota é atribuída de acordo com o grau de atendimento ao critério relacionado com o fator de desempenho, os quais, por sua vez, possuem um peso atribuído à sua parcela de contribuição no conjunto.

Os fatores selecionados, com seus respectivos pesos foram:

1-Condutividade hidráulica saturada (valor e manutenção ao longo do tempo) – PESO 2

2- Faixa de variação da umidade ao longo do período – PESO 1

3-Taxa de infiltração – PESO 1

4-Infiltração acumulada ao longo de um período – PESO 3

5-Manutenção da integridade da cobertura ao longo do tempo – PESO 3

As notas foram atribuídas de acordo o seguinte score:

1 – Não atendimento ao critério

2 – Atendimento parcial ao critério

3 – Atendimento pleno ao critério

3.8.1 Condutividade hidráulica saturada

Embora tenham sido obtidos dados de campo optou-se por considerar apenas os dados de laboratório, pelo fato de terem sido obtidos dados no intervalo de pelo menos um ano, o que revela se há manutenção do mesmo valor ao longo do tempo, o que é essencial a uma cobertura.

O critério a ser atendido nesta análise é um valor de 10^{-9} $m.s^{-1}$ ou menos e manutenção da mesma ordem de valor ao longo do período.

3.8.2 Faixa de variação da umidade durante um ano

Se a umidade da cobertura varia a um nível muito elevado de amplitude, pode significar alcance a níveis elevados de infiltração.

O critério a ser atendido é uma variação da faixa de umidade do solo da cobertura de até 60% da umidade de saturação do solo obtida em laboratório.

3.8.3 Taxa de Infiltração

Relaciona-se com a velocidade de ingresso da água no solo da cobertura. Maiores taxas significam maior possibilidade de geração de lixiviados em um mesmo intervalo de tempo.

O critério a ser atendido é a manutenção de uma taxa de infiltração ao longo do tempo de até 60% da condutividade hidráulica do solo saturado.

3.8.4 Infiltração acumulada

Um critério proposto para aterros de disposição de resíduos como aceitável para um mínimo de infiltração, segundo Hauser (2009), é a média da taxa anual de infiltração não exceder a 3% da precipitação anual.

3.8.5 Manutenção da integridade da cobertura

Uma das premissas básicas de uma cobertura está ligada com o próprio requisito de existência de um aterro, que é o de ser estável por muitos anos. Portanto, a manutenção da integridade da cobertura é imprescindível para seu desempenho. Além disso, rachaduras e fendas podem resultar em perda de sua função (Peng & Jiang, 2009).

O critério a ser atendido é inexistência de danos quaisquer principalmente fendas e rachaduras causadas pelo ressecamento.

3.8.6 Pontuação Final

O desempenho de cada fator foi obtido multiplicando-se as notas atribuídas pelo seu respectivo peso. O resultado final da avaliação do desempenho das coberturas estudadas para fins de comparação considerou a soma dos resultados de todos os fatores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Introdução

Os resultados obtidos dos ensaios e sua discussão são apresentados ao longo deste capítulo. Os dados relacionados ao clima, determinação de parâmetros geotécnicos e hidráulicos do solo utilizado nas células experimentais e ensaios de campo além do resultado da simulação numérica destas camadas, foram reunidos e utilizados para discutir o desempenho das camadas de cobertura estudadas. Por fim, uma análise comparativa do desempenho das coberturas é apresentada.

4.2 Fatores climatológicos

4.2.1 Precipitação

As Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam dados sobre a incidência de chuvas durante o período de monitoramento.

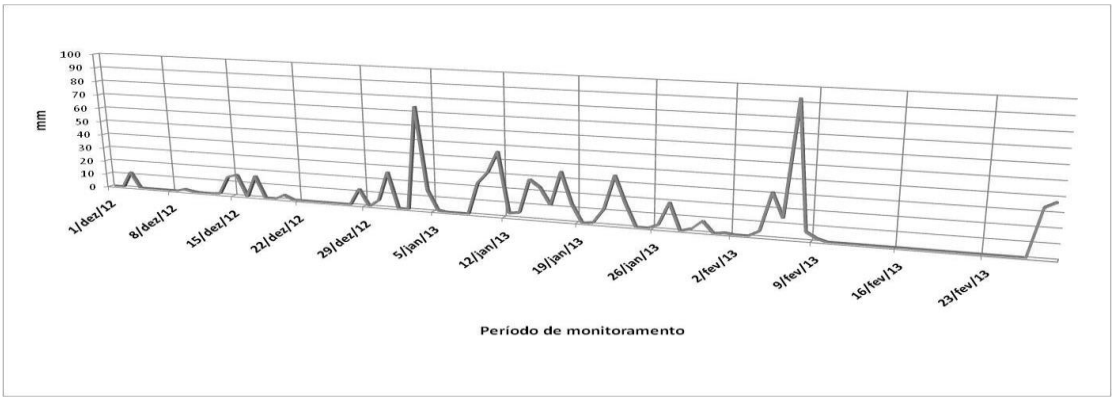

Figura 4.1 – Índice pluviométrico diário durante o período de monitoramento da etapa preliminar (dados locais fornecidos pela CTR Seropédica)

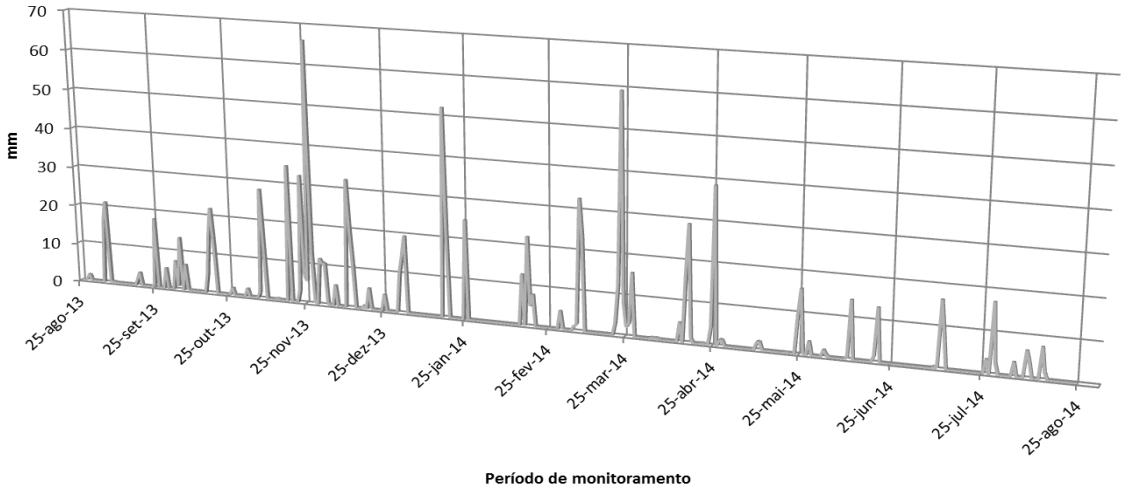

Figura 4.2 – Índice pluviométrico diário durante o período de monitoramento da etapa principal, 25/ago/2013 a 24/ago/2014(dados locais fornecidos pela CTR Seropédica)

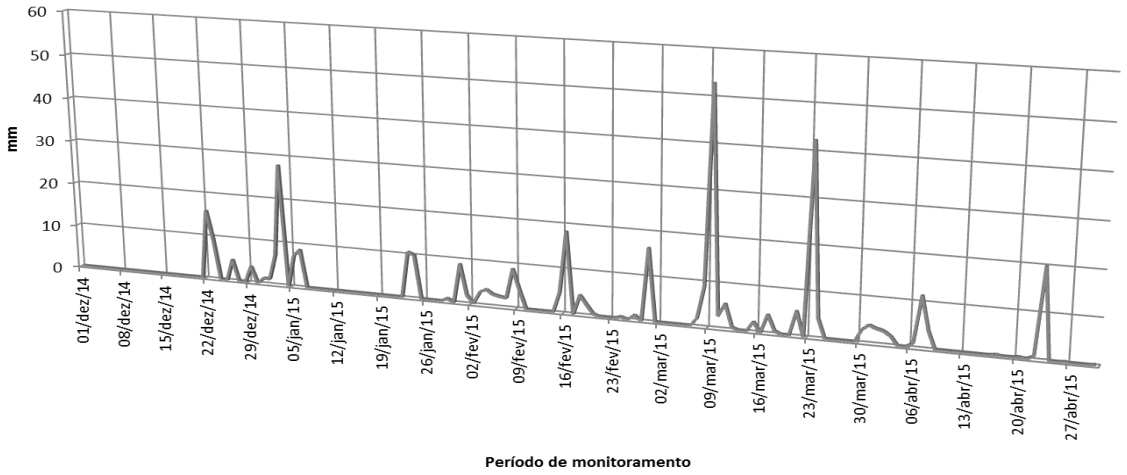

Figura 4.3 – Índice pluviométrico diário durante o período de monitoramento da etapa complementar (dados locais fornecidos pela CTR Seropédica)

Destaca-se que, apesar de durante a etapa preliminar ter ocorrido um elevado índice pluviométrico, durante o período de monitoramento da etapa principal este índice foi bem menor.

Para ilustrar melhor, nos três meses que compuseram a etapa preliminar (dezembro de 2012 a fevereiro de 2013), choveu 730 mm (Figura 4.1), mais do que o total do ano inteiro de 2014 (723,1 mm). Se por um lado este fato foi muito positivo para o andamento da pesquisa, por outro lado acarretou na interrupção da mesma, pois a área onde o experimento foi instalado foi requisitada emergencialmente pela gerência do aterro para construção de uma lagoa de lixiviado, uma vez que a geração do mesmo aumentou rapidamente e o aterro ainda não possuía uma estação de tratamento.

A etapa principal contou com duas estações secas e uma chuvosa. Durante o período da etapa principal, a quantidade de dias chuvosos ficou em torno de 20% do total do número de dias do ano. Os dias que tiveram as maiores precipitações no período etapa principal foram 26 de novembro de 2013 (66,2mm), 17 de janeiro de 2014 (52,2mm) e 23 de março de 2014 (59,4mm), enquanto que no período da etapa preliminar, ocorreram dias com até 93,0mm (em 07 de fevereiro de 2013). O total de precipitação da etapa principal (25 de agosto de 2013 a 24 de agosto de 2014) foi de 1079 mm.

No período da etapa complementar (dezembro de 2014 a abril de 2015), o índice pluviométrico ficou em 390 mm, menor que no igual período de 2013 (975 mm) e no mesmo período de 2014 (562 mm). Portanto, houve novamente uma inesperada redução de chuvas ainda maior.

Como pode ser observado na Figura 4.3, as chuvas passaram a ocorrer com maior frequência a partir do final de janeiro de 2015.

A Figura 4.4 apresenta uma comparação do índice pluviométrico mensal entre os anos de 2013, 2014 e 2015, para melhor visualização da diferença entre os anos, ou seja, redução da quantidade de chuva durante a estação chuvosa, não desejável para o estudo, principalmente no caso da cobertura do tipo barreira capilar.

Tabela 4.1 – Médias mensais de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento para o período da etapa preliminar

Meses	Temperatura máx. (°C)	Temperatura mín. (°C)	UR máx. %	UR mín. %	Veloc. Vento ($m.s^{-1}$)
Dez 2012	24,6	23,4	86,5	80,9	1,7
Jan 2013	25,7	24,6	87,3	82,3	2,0
Fev 2013	28,0	21,8	82,0	75,9	2,1

Tabela 4.2 – Médias mensais de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento para o período da etapa principal

Meses	Temperatura máx. (°C)	Temperatura mín. (°C)	UR máx. %	UR mín. %	Veloc. Vento ($m.s^{-1}$)
Ago 2013	21,8	20,3	80,5	74,4	2,4
Set 2013	23,5	22,1	77,8	71,8	2,5
Out 2013	23,6	22,5	81,7	76,3	2,4
Nov 2013	24,8	23,7	82,9	77,9	2,2
Dez 2013	26,0	24,9	86,3	81,1	2,1
Jan 2014	36,1	22,6	97,7	40,5	2,6
Fev 2014	36,3	22,6	95,9	36,5	2,6
Mar 2014	32,1	21,8	99,1	52,9	2,1
Abr 2014	29,5	19,7	100,0	58,6	1,9
Mai 2014	28,2	17,3	99,3	54,9	1,9
Jun 2014	28,2	17,8	99,4	54,4	2,0
Jul 2014	26,1	16,3	98,9	55,9	1,9
Ago 2014	27,4	16,1	98,2	47,0	2,2

Tabela 4.3 – Médias mensais de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento para o período da etapa complementar

Meses	Temperatura máx. (°C)	Temperatura mín. (°C)	UR máx. %	UR mín. %	Veloc. Vento ($m.s^{-1}$)
Dez 2014	34,2	22,0	97,5	45,7	2,7
Jan 2015	29,7	28,1	73,6	66,3	2,8
Fev 2015	27,8	26,5	81,6	75,2	2,3
Mar 2015	26,3	25,1	87,1	81,7	1,8

O período correspondente a etapa preliminar apresentou meses com menor temperatura do que o período correspondente das demais etapas, e na etapa principal, meses com maior temperatura. Em relação à umidade relativa do ar (UR), o período correspondente a etapa preliminar apresentou meses com menor umidade relativa do que o período correspondente das demais etapas, e na etapa complementar, meses com ar mais seca. A combinação temperatura elevada e umidade relativa em menor nível favorece o aumento da evaporação, o que é desejável para coberturas do tipo barreira capilar.

Em relação a velocidade do vento, os valores (médias mensais) apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 não variaram muito, mesmo dentro de um ano. De acordo com a escala de Beaufort (CEPAGRI, 2015), a faixa de valores encontrados corresponde ao grau 2 – Brisa Amena.

A evaporação e o balanço hídrico no período de monitoramento da etapa principal foram obtidos pelo software de simulação numérica Vadose e serão apresentados no item 4.7.

4.3 Características geotécnicas do solo empregado nas camadas de cobertura

A Tabela 4.4 apresenta a caracterização geotécnica: limites de Atterberg (que indicam a consistência do solo): limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) e a massa específica dos grãos. A Figura 4.5 apresenta a curva granulométrica do solo “A”, que, foi utilizado durante todo o experimento, em todas as células experimentais, exceto na célula C’, onde foi substituído pelo solo “B”. A Figura 4.6 apresenta os resultados do ensaio de compactação deste mesmo solo. Para o solo “B”, similarmente os resultados das características geotécnicas e compactação estão na Tabela 4.5. e nas Figuras 4.7, 4.8.

Tabela 4.4– Caracterização do solo “A” empregado nas camadas de cobertura das células experimentais C, BC, CV e REF

Parâmetros	Resultados
Granulometria	
Argila (%)	10,0
Silte (%)	30,0
AreiaFina (%)	14,0
Areia Média (%)	30,0
Areia Grossa (%)	16,0
Pedregulho (%)	0,0
Limites de Atterberg	
LL	56,5 %
LP	34,4 %
IP	22,1 %
Massa específica dos grãos	27,5 $kN.m^{-3}$

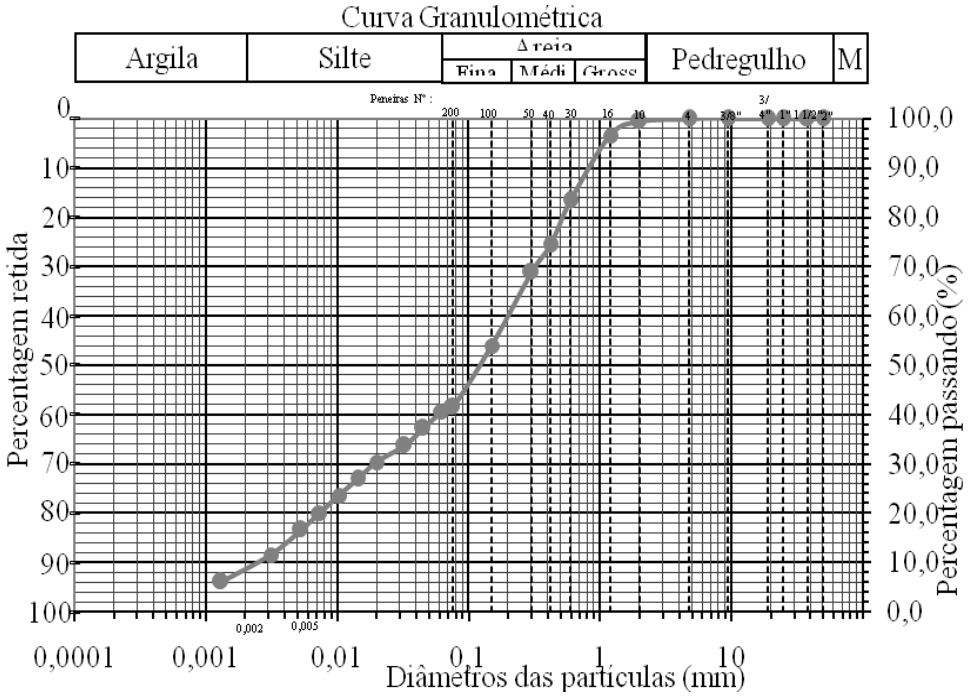

Figura 4.5: Curva granulométrica do solo empregado em camadas de cobertura das células experimentais M, BC, ET e REF

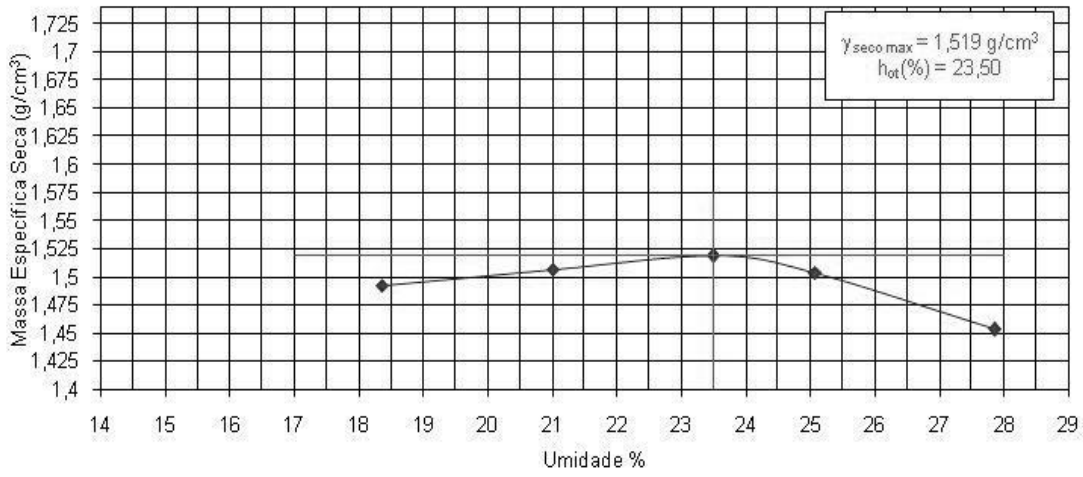

Figura 4.6– Resultados do ensaio de compactação do solo empregado em camadas de cobertura das células experimentais C, BC, CV e REF

Tabela 4.5 – Caracterização do solo “B” empregado na camada de cobertura da célula experimental C’

Parâmetros	Resultados
Granulometria	
Argila (%)	8,0
Silte (%)	38,0
AreiaFina (%)	12,0
Areia Média (%)	24,0
Areia Grossa (%)	14,0
Pedregulho (%)	4,0
Limites de Atterberg	
LL	49,7 %
LP	27,8 %
IP	21,8 %
Massa específica dos grãos	27,4kN.m^{-3}

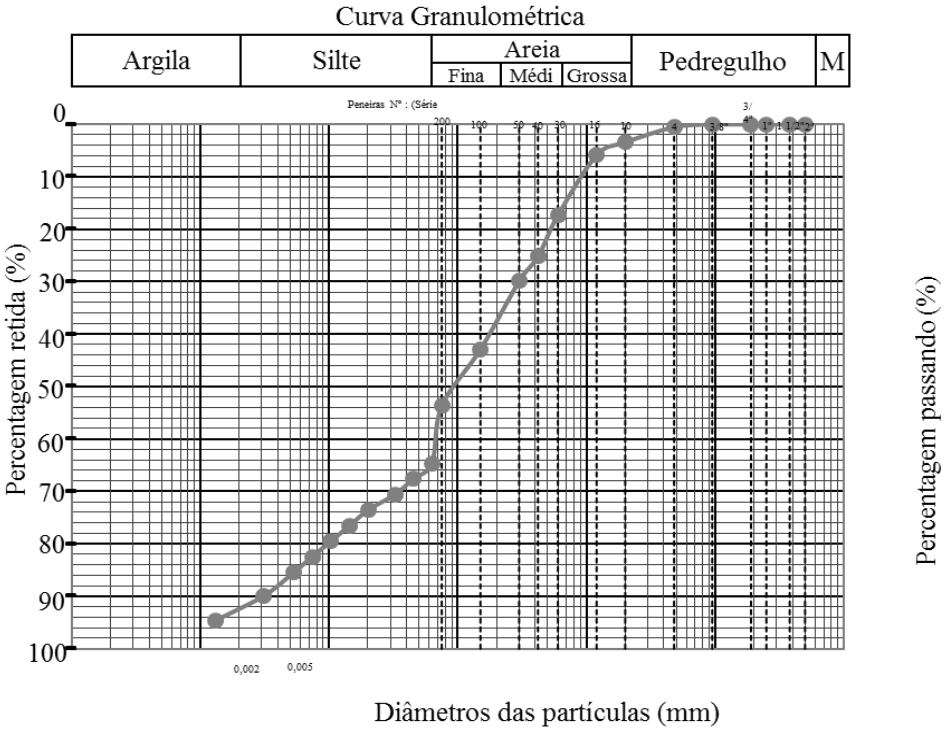

Figura 4.7 – Curva granulométrica do solo empregado na camada de cobertura da célula experimental C’

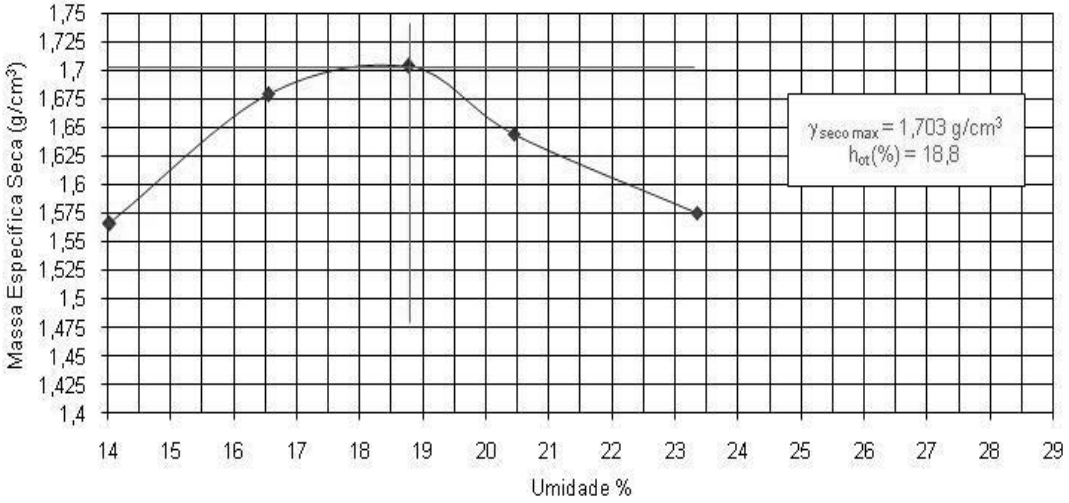

Figura 4.8 – Resultados do ensaio de compactação do solo empregado na camada de cobertura da célula experimental C'

A Tabela 4.6 apresenta os resultados do ensaio de massa específica aparente em campo e da determinação do grau de compactação do solo empregado nas células experimentais CV, C, BC e C´.

Tabela 4.6 - Resultados do ensaio de densidade *in situ* e grau de compactação do solo de CV, C, BC e C´.

Célula experimental	**CV**	**C**	**BC**	**C'**
Densidade úmida (g/cm^3)	1211	1512	1428	1636
Densidade seca (g/cm^3)	1098	1238	1235	1457,6
Densidade seca laboratório (g/cm^3)	1519	1519	1519	1703
Umidade %	10,5	8,1	9,9	8,9
Grau de compactação %	**72,2**	**81,5**	**81,3**	**85,6**

O solo "A", caracterizado conforme Tabela 4.4 possui um teor de areia elevado (60%) e 10% de argila, caracterizando um solo de granulometria grossa (mais da metade é maior que a abertura da peneira de malha n.40). O solo "B" possui teor pouco menor de areia (50%) e similar teor de argila (8%), conforme Tabela 4.5; destaca-se como diferença o teor superior de silte do solo "B" em comparação com o solo "A", além da presença de pedregulho.

A análise dos resultados indica a classificação, segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), do solo “A” como sendo areia siltosa (SM). Em relação ao solo “B”, os resultados de granulometria levaram à esta mesma classificação.

Os resultados apresentados demonstram que os solos são muito similares em termos de composição granulométrica. Similar conclusão se dá em relação aos limites de consistência, com valores muito próximos, e à massa específica dos grãos, de valor idêntico entre ambos os solos. São tipicamente solos residuais de gnaisse.

Entretanto, esta tendência não se repetiu com relação ao ensaio de compactação, pois os resultados levam a uma diferença de comportamento, conforme pode ser constatado nas Figuras 4.6 e 4.8, observando-se diferenças nas faixas de umidade, na umidade ótima e no peso específico seco máximo. Esta diferença pode ser uma razão para o valor do grau de compactação ser maior na célula C’ (85,6%), embora os resultados tenham apontado pouca variação do mesmo entre as células experimentais. O tempo de construção desta célula, quando o ensaio foi realizado, foi menor que as demais (a célula tinha sido recentemente construída, recebendo o solo “B”, enquanto as demais tinham mais de um ano de tempo). Portanto, havia indicação de vantagens na utilização do solo “B”, entretanto ainda não era possível concluir sobre o desempenho de um ou outro solo.

Entretanto, possivelmente a compactação foi mais eficaz neste solo B, pois o solo tem características de compactação melhores em relação ao outro, conforme pode ser observado na Figura 4.8.

Ainda em relação aos resultados do grau de compactação, destaca-se que a célula CV apresentou o resultado menor, o que pode estar ligado à ação das raízes da vegetação, diminuindo a compactação, considerando que a cavidade realizada no ensaio é bem próxima à superfície do terreno, onde atua a grama que constitui a camada vegetada desta célula experimental.

4.4 Parâmetros hidráulicos do solo empregado nas camadas de cobertura

4.4.1 Determinação da condutividade hidráulica do solo saturado em laboratório

A Tabela 4.7 apresenta os resultados de condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) em laboratório, para as amostras indeformadas dos três tipos de camada de cobertura estudadas, no início do experimento (etapa principal)

A Tabela 4.8 apresenta os resultados de ensaio de laboratório de condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}), para amostras de cada célula experimental, após decorrido um ano de andamento do experimento (final da etapa principal).

A Tabela 4.9 apresenta os resultados de ensaio de laboratório de condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}), para amostras de cada célula experimental, no início da etapa complementar.

Tabela 4.7 – Resultados de K_{sat} do solo saturado empregado nas camadas de cobertura das células C, BC e CV no início do experimento (etapa principal)

Célula experimental	**Ksat ($m.s^{-1}$)**
C	$4{,}84 \times 10^{-6}$
BC	$6{,}35 \times 10^{-7}$
CV	$2{,}36 \times 10^{-6}$

Tabela 4.8 – Resultados de K_{sat} do solo saturado (K_{sat}), em $m.s^{-1}$ e $mm.h^{-1}$, nas células C e BC, após decorrido um ano de monitoramento (final da etapa principal)

C		BC	
Ksat ($m.s^{-1}$)	**Ksat ($mm\ h^{-1}$)**	**Ksat ($m.s^{-1}$)**	**Ksat ($mm\ h^{-1}$)**
$2,51 \times 10^{-5}$	90,4	$9,88 \times 10^{-7}$	3,56
$1,21 \times 10^{-5}$	43,5	$4,12 \times 10^{-6}$	14,8
$2,69 \times 10^{-5}$	96,7	$3,21 \times 10^{-6}$	11,6

Tabela 4.9 – Resultados de condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat), em $m.s^{-1}$ e $mm.h^{-1}$, nas células experimentais C, BC e CV, no início da etapa complementar

C		BC		CV	
Ksat ($m.s^{-1}$)	**Ksat ($mm\ h^{-1}$)**	**Ksat ($m.s^{-1}$)**	**Ksat ($mm\ h^{-1}$)**	**Ksat ($m.s^{-1}$)**	**Ksat ($mm\ h^{-1}$)**
$8,73 \times 10^{-8}$	0,31	$3,67 \times 10^{-6}$	13,20	$1,18 \times 10^{-5}$	42,50
$7,05 \times 10^{-7}$	2,50	$6,93 \times 10^{-7}$	2,50	$4,27 \times 10^{-6}$	15,40
$6,64 \times 10^{-6}$	23,90	-		$4,07 \times 10^{-6}$	14,70
-	-	$6,48 \times 10^{-6}$	23,30	$2,95 \times 10^{-6}$	10,60
$1,48 \times 10^{-7}$	0,53	$1,85 \times 10^{-6}$	6,66	$1,61 \times 10^{-6}$	5,78
-	-	$1,64 \times 10^{-6}$	5,90	-	-
$1,31 \times 10^{-6}$	4,70	-	-	$6,84 \times 10^{-7}$	2,46
$4,54 \times 10^{-6}$	16,30	-	-	-	-
$\overline{x} = 2,24 \times 10^{-6}$	$\overline{x} = 8,1$	$\overline{x} = 2,87 \times 10^{-6}$	$\overline{x} = 10,3$	$\overline{x} = 4,23 \times 10^{-6}$	$\overline{x} = 15,2$
$\sigma = 2,72 \times 10^{-6}$	$\sigma = 9,7$	$\sigma = 2,05 \times 10^{-6}$	$\sigma = 7,3$	$\sigma = 3,97 \times 10^{-6}$	$\sigma = 14,3$

$\overline{x}$ = média; σ = desvio padrão

A Tabela 4.10 apresenta os resultados de ensaio de laboratório de condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}), para amostras de solo “B” (célula experimental C’), no início da etapa complementar.

Tabela 4.10 – Resultados de condutividade hidráulica do solo saturado do solo B, empregado na célula experimental C’ (etapa complementar)

Ksat ($m.s^{-1}$)	**Ksat ($mm\ h^{-1}$)**
$8,66 \times 10^{-6}$	31,20
$1,82 \times 10^{-6}$	6,55
$3,03 \times 10^{-7}$	1,09
$1,30 \times 10^{-7}$	46,70
$6,20 \times 10^{-7}$	2,23
$7,54 \times 10^{-6}$	27,10
-	-
$9,93 \times 10^{-7}$	3,57
$8,66 \times 10^{-6}$	31,20
$x = 7,90 \times 10^{-6}$	x= 10,3
$\sigma = 1,37 \times 10^{-5}$	σ = 12,1

x = média; σ = desvio padrão

Os resultados de K_{sat} no início do experimento fornecem um indicativo das condições iniciais do solo “A” utilizado nas células experimentais. A ordem de grandeza dos valores encontrados corresponde a valores típicos de areias argilosas e siltosas não compactadas em consonância com os resultados da

caracterização do solo. No entanto, são valores elevados para camada de cobertura compactada.

Considerando os resultados da Tabela 4.8 (após um ano de experimentação), comparando-se os três tipos de cobertura do estudo (C x BC x CV), cujas médias e desvio padrão de infiltração foram, respectivamente, 8,9±9,7 $mm.h^{-1}$, 29,7±43,9 $mm.h^{-1}$ e 15,2±14,3 $mm.h^{-1}$, pode-se sugerir que a cobertura C foi superior por apresentar valores médios e desvio padrão menores. Entretanto, os coeficientes de variação destes resultados foram elevados, variando de 93,7% (para CV) até 71,5% (para BC).

Considerando que a condutividade hidráulica relaciona-se com a infiltração da água no solo, elevados valores deste parâmetro implicam em baixo desempenho da cobertura, assim como a recíproca é verdadeira. Nos EUA, tem se adotado como referência o valor de 10^{-9} $m.s^{-1}$ ($3,6x10^{-3}$ $mm.h^{-1}$), em consonância com o estabelecido no RCRA (EPA, 2011), como sendo o valor máximo de condutividade hidráulica saturada que um sistema de cobertura final pode apresentar para utilização em aterros de resíduos. Se for levado em consideração este valor, nenhuma destas coberturas estudadas seria aceita para serem empregadas como barreira física funcional à infiltração de água, nem no início do seu funcionamento, menos ainda um ano depois. No entanto, vale ressaltar que as camadas ensaiadas, da forma como a operação do Aterro está executando, não tem características ainda de camada final e sim camadas intermediárias.

Os valores encontrados revelaram alteração da condutividade hidráulica saturada após um ano de estudo. Por exemplo, para a célula BC, era inicialmente $6,35x10^{-7}$ $m.s^{-1}$ e houve um aumento da ordem de 10 vezes. Este tipo de alteração, por não ser desejável ao longo do tempo, não é indicador de bom desempenho de uma cobertura, o que é abordado em alguns trabalhos na literatura. Albright et al. (2006) estudando o desempenho de camadas de cobertura do tipo convencional, com configuração de 0,45m de solo classificado como SC (muito próximo, portanto, ao tipo de solo do aterro de Seropédica) compactado, coberto com uma camada de 0.15m do mesmo solo, não compactado, em clima úmido, obtiveram, por meio de um controle elevado

da compactação do solo, uma condutividade hidráulica saturada menor que 1 x 10^{-9} $m.s^{-1}$. Após quatro anos de funcionamento, os autores realizaram medições de condutividade hidráulica saturada e constataram um aumento da ordem de 1000 vezes, chegando a 1 x 10^{-6} $m.s^{-1}$. Os autores ainda realizaram escavações e testes com traçadores, chegando a conclusão sobre a existência de extensas fissuras e raízes em desenvolvimento, causadores do fluxo preferencial, em toda a extensão da camada de cobertura.

Mudanças na condutividade hidráulica do solo de uma cobertura podem ser causadas devido ao surgimento de fendas e rachaduras causadas por sucessivos ciclos de umedecimento e ressecamento do solo, ciclos de congelamento e derretimento (não aplicável a solos brasileiros em geral) e intrusão de biota, incluindo raízes de vegetação, conforme estudado por alguns autores, dentre estes são citados Melchior (1997), Albrecht & Benson (2001). As fendas e rachaduras implicam na ocorrência do fluxo preferencial, afetando significativamente o comportamento da condutividade hidráulica do solo.

Com relação aos resultados apresentados na Tabela 4.10, relativos ao solo “B” (célula experimental C’), comparando-se com os resultados do solo “A” apresentado na Tabela 4.9, os valores de condutividade hidráulica obtidos indicam que o solo na C’ (10,3±12,1 $mm.h^{-1}$) não apresentou valores melhores do que o solo da célula C (8,9±9,7 $mm.h^{-1}$), o que confirma a similaridade de solos e a não justificativa de destinações distintas destes solos dentro do aterro, o que já vinha sendo indicado pelos resultados dos parâmetros da caracterização geotécnica.

Os resultados obtidos indicam o quanto a prática das coberturas intermediárias em aterros sanitários, comum em áreas onde ainda será depositado resíduo, na maioria das vezes sem controle de compactação, pode promover uma permeabilidade alta do solo, quando saturado. Ressalta-se ainda que o solo local, arenoso, contribui mais para esta ocorrência. Estas áreas ficam expostas por muito tempo (muitas vezes mais de um ano). Portanto, devido a alta permeabilidade, será maior a geração de lixiviados.

4.4.2 Determinação da condutividade hidráulica do solo saturado em campo

A Tabela 4.11 apresenta os resultados de condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) obtidos no ensaio de campo realizado.

Tabela 4.11 – Resultados do ensaio de condutividade hidráulica do solo saturado empregado nas células experimentais CV, C e BC, realizado em campo

Tratamento	**Repetição**	**Ksat ($m.s^{-1}$)**	**Ksat ($mm.h^{-1}$)**
CV	1	$2,72x10^{-5}$	60,36
CV	2	$2,78 x10^{-5}$	61,73
CV	3	$2,97 x10^{-5}$	65,85
C	1	$2,97 x10^{-5}$	65,85
C	2	$2,76 x10^{-5}$	61,14
C	3	$2,97 x10^{-5}$	65,85
BC	1	$4,45 x10^{-5}$	98,77
BC	2	$2,97 x10^{-5}$	65,85
BC	3	$2,97 x10^{-5}$	65,85

Os resultados apresentados na Tabela 4.11 indicaram pouca diferença entre os valores de condutividade hidráulica das células experimentais e das repetições dentro de cada uma delas.

O ensaio em condições de campo revelou um comportamento distinto dos resultados em relação ao do laboratório, pois os valores de condutividade hidráulica foram da ordem de 10 a 100 vezes maior que os valores de laboratório. Destaca-se, ainda, que os valores variaram menos entre os diferentes tipos de cobertura estudados do que em relação aos resultados de laboratório. Uma possível causa para a diferença entre campo e laboratório

pode estar relacionada à amostragem. Ressalta-se a dificuldade encontrada para a obtenção de amostras indeformadas em solos empregados como cobertura de aterro sanitário, que são compactados e, na maioria das vezes, em umidade relativamente baixa. Contudo, por se tratar de um aterro, um limitante pode ser a possível presença de frações de resíduos sólidos nas amostras indeformadas avaliadas.

Outro fator que pode justificar esta diferença de resultados entre campo e laboratório é a presença de rachaduras ou fendas em condições de campo, que não são incluídas nas amostras indeformadas. A condutividade saturada é frequentemente governada por macroporos, por isso a presença rachaduras pode afetar os resultados (DEXTER, 2004). Como abordado no item 4.6.1.1., elas realmente existiam em significativa quantidade, embora tenham sido levado em consideração durante escolha dos pontos onde o permeâmetro foi fixado.

Uma última hipótese para a diferença de resultados está relacionada ao método de laboratório empregado na obtenção da condutividade hidráulica. De acordo com a literatura (Gardner, 1986; Libardi, 2000), os permeâmetros de carga constante, aparelhos utilizados para determinação da condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}), são recomendados para solos que apresentam alto K_{sat}, enquanto que os de carga decrescente são descritos como adequados para solos com baixo K_{sat}. Devido principalmente ao fato de não se conhecer a priori a ordem de valores ocorrentes de k_{sat}, foi empregado o método de carga decrescente. Marques et al., 2008, compararam os dois métodos de laboratório (de carga constante e de carga decrescente) e concluíram que para o solo que estudavam o de carga constante foi o mais apropriados.

De qualquer forma, os resultados de campo não invalidam os obtidos em laboratório e as discussões deles decorrentes, pelo contrário, reforçam a indicação de quão alta condutividade hidráulica possui o material empregado nas coberturas em condições saturadas.

saturação em REF e umidade residual em CV podem ser atribuídos a diferenças na compactação ou à amostragem.

Com relação às curvas apresentadas nas Figuras 4.10 e 4.11, devido a resultarem em grande diferença de faixas de umidade e de sucção, somando-se ao fato de as curvas obtidas pelo método do papel-filtro apresentarem uma concentração de pontos no final da faixa de sucção, ficou inviabilizada uma comparação das curvas entre os dois métodos. Entretanto, considera-se uma vantagem ter sido obtidas estas curvas com diferentes tipos de faixas, porque uma acaba complementando a outra quando há necessidade de emprego destes dados. Por exemplo, no caso de sucções maiores de 1500 kPa, o uso da curva pelo método do extrator de placa porosa fica limitado, mas a curva pelo método do papel filtro apresentou resultados para sucções em torno de 10000 kPa. As Figuras 4.12 e 4.13 foram elaboradas com a junção dos pontos destas duas curvas na tentativa de ilustrar melhor este ponto de vista. Nota-se que em geral houve convergência na junção das curvas, apesar de alguns pontos na faixa de 4 a 60 kPa não estarem adequados.

Outro ponto salientado é que, apesar de as faixas de umidade e potencial terem sido diferentes, em ambos os métodos houve pouca variação entre os diferentes tipos de cobertura (exceto BC3 na Figura 4.9, provavelmente discrepante), sugerindo que não houve divergências que apontassem problemas na adequação das curvas característica na água do solo.

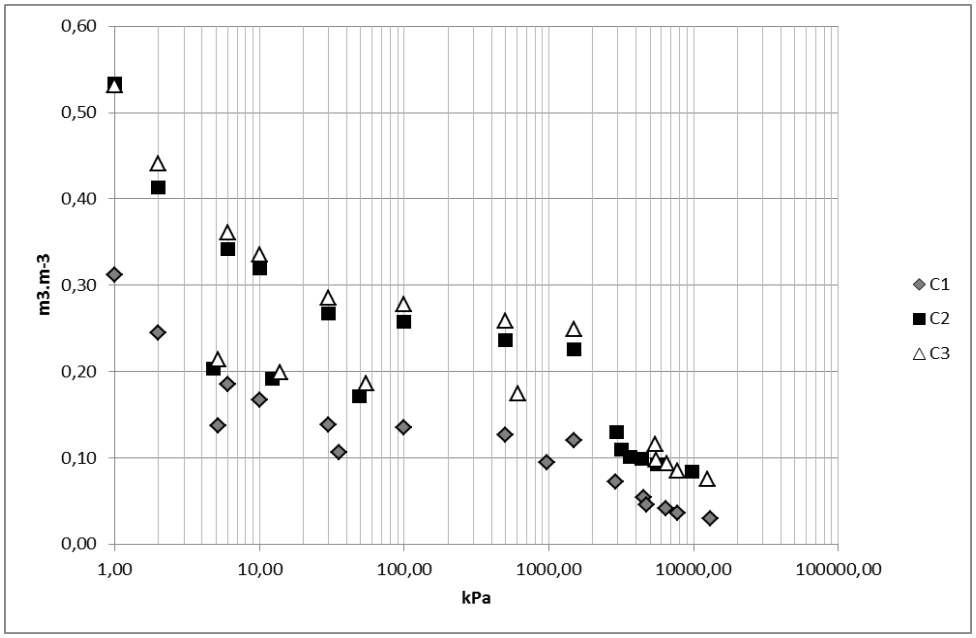

Figura 4.12 – Curva característica da água no solo empregado na cobertura da célula experimental C, com os pontos obtidos pelo método do papel filtro e método do extrator de placa porosa

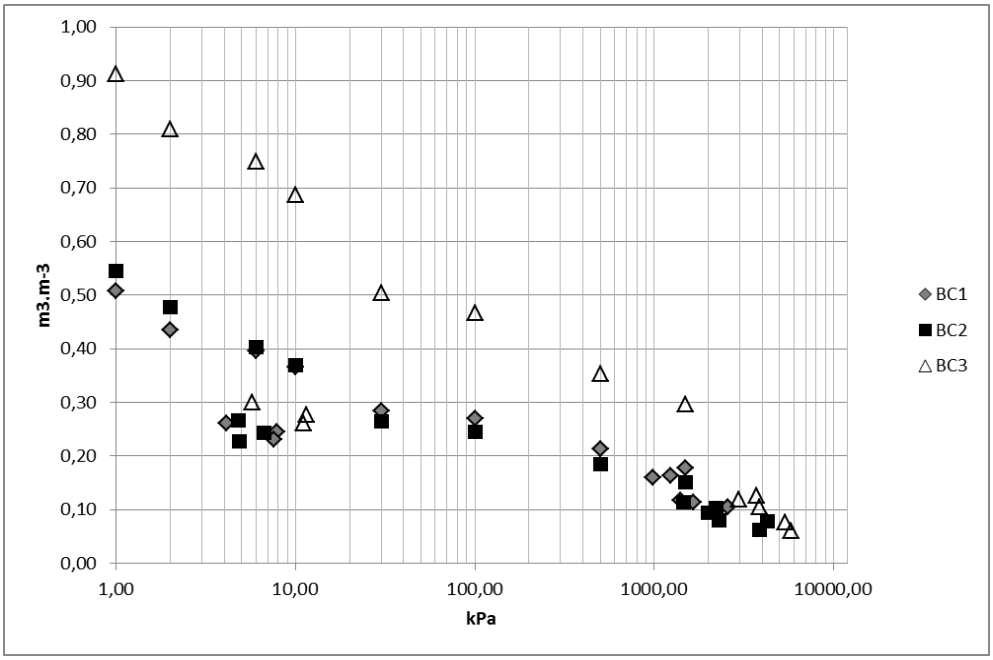

Figura 4.13 – Curva característica da água no solo empregado na cobertura da célula experimental BC, com os pontos obtidos pelo método do papel filtro e método do extrator de placa porosa

promovem fluxo preferencial) e desintegração da camada de cobertura.

- As curvas da célula CV apresentaram comportamento distinto das curvas das outras células: maior declividade, umidade residual bem inferior. Também foram as curvas que apresentaram menor variação entre si.

- As curvas da célula C´ apresentaram similaridade com as curvas da célula C, confirmando que possuem características de solos similares, o que reforça a hipótese de não justificativa de destinações distintas aos mesmos dentro do aterro de Seropédica.

Em relação às curvas característica utilizadas na simulação numérica, incluindo dos outros materiais utilizados na barreira capilar, estas serão apresentadas no item 4.7

4.5 Resultados do monitoramento em campo

Os monitoramentos propostos (umidade do solo, temperatura do solo, sucção do solo e infiltração da água) nas coberturas em estudo foram realizados e os resultados serão apresentados neste item. Em relação à etapa preliminar, considerou-se que não houve um monitoramento efetivo, por terem sido realizadas poucas coletas de dados, em razão da interrupção do experimento, conforme anteriormente mencionado. Neste caso, optou-se por apresentar apenas os resultados de umidade do solo, porque foram obtidos alguns resultados relevantes. Por serem obtidos em época chuvosa, na verdade os poucos dados proporcionaram uma análise preliminar, e juntamente com a própria experiência na instalação foram úteis para melhorar o experimento assim que houve a possibilidade de novamente instalá-lo.

Considerando a calibração do sensor de umidade realizada, os resulrados indicaram que os sensores apresentam um erro pouco expressivo, da ordem de 6%. A curva de calibração obtida encontra-se no Apêndice A.

Em relação aos resultados de sucção, estes ficaram restritos à etapa principal, em razão dos resultados obtidos, conforme discussão que será apresentada no item 4.5.3.

4.5.1 Monitoramento da umidade do solo

Os resultados do monitoramento da umidade do solo contribuíram significativamente com informações para análise do desempenho das coberturas. Além disso, o monitoramento da umidade pode proporcionar uma informação imediata da integridade da cobertura, uma vez que mudanças significativas na umidade podem prover informações sobre degradação devido à erosão, biointrusão, entre outros danos (DWYER, 2007)

4.5.1.1.Resultados do monitoramento da umidade do solo na etapa preliminar

Foram obtidos resultados de umidade volumétrica do solo em três ocasiões, conforme apresentado nas Figuras 4.15 a 4.17, por cada um dos sensores em ambas as células então estudadas, cobertura convencional e barreira capilar.

As Figuras 4.15 e 4.16 referem-se aos resultados de cada sensor de umidade do solo nas profundidades 0,20m e 0,40m, respectivamente

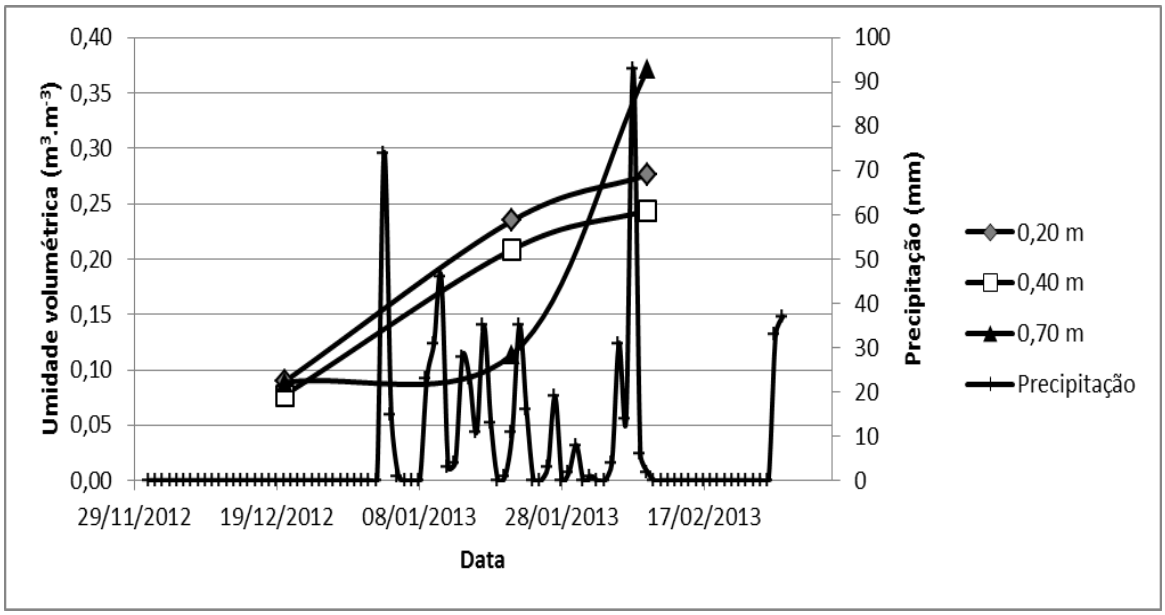

Figura 4.17: Umidade volumétrica ao longo de meses chuvosos na barreira capilar , durante etapa preliminar

A partir do final de dezembro, houve chuvas intensas, que se traduziram em acentuado aumento da umidade em ambas as profundidades, 0,20m (Figura 4.15) e 0,40m (Figura 4.16). Importante observar que a evolução da umidade ao longo do período apresentou praticamente o mesmo comportamento em relação às duas profundidades. Ou seja, o aumento de umidade em decorrência das chuvas que ocorreram na região mais próxima à superfície se repetiu proporcionalmente na profundidade próxima ao final da camada. Este fato sugere que, durante o intervalo de tempo entre cada data de medição, houve significativa infiltração dentro da camada de cobertura de solo, sendo maior na barreira capilar.

A elevação brusca da umidade na profundidade 0,70m (portanto, na camada de areia) ocorrida no intervalo de tempo entre a segunda e a terceira data de coleta de dados ocorrida na barreira capilar, apresentada na Figura 4.17, indica que o ponto de quebra de capilaridade ocorreu neste intervalo, o que permitiu que a umidade até a segunda data pouco alterada, fosse elevada em decorrência da entrada de água na camada de areia. Consequentemente,

os sensores contidos na camada de solo (0,20 m e 0,40 m) revelaram elevação da umidade em maior proporção do que os instalados na camada de solo de igual espessura que compôs a cobertura convencional. A umidade na barreira capilar que era menor do que na cobertura convencional no início do período, passou a ser maior, enquanto que a cobertura convencional apresentou uma tendência de manutenção do mesmo nível de umidade.

Apesar de ter sido uma etapa preliminar, ficou evidente que, para as configurações adotadas, a barreira capilar não apresentou desempenho superior à cobertura convencional em condições de alta pluviosidade.

4.5.1.2 Resultados do monitoramento da umidade do solo na etapa principal

Como mencionado anteriormente, a etapa considerada principal contou com um período de um ano de monitoramento. Com a nova disponibilização da área cerca de seis meses após a intervenção na etapa anterior, o período de monitoramento, final de agosto de 2013 a final de agosto de 2014, contou apenas com uma estação chuvosa. Este fato, somando-se ao problema de anormalidade de chuvas de 2014, não contribuiu para que o estudo fosse conduzido nas condições mais adequadas, a fim de verificar o desempenho das camadas de cobertura durante alta precipitação. Apesar disso, constatações importantes foram realizadas com os resultados obtidos.

Com o experimento modificado pela introdução de mais células experimentais, além da diminuição da área e da quantidade de sensores de umidade disponíveis para cada uma delas, voltou-se a realizar o monitoramento da umidade do solo, durante o período de um ano.

As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam a variação da umidade ao longo do período de monitoramento, para as profundidades estudadas em todas as células experimentais, 0,20m e 0,40m e as precipitações medidas.

A umidade inicial, em meados de agosto de 2013, na maioria das células, não ultrapassava 0,15 $m^3.m^{-3}$, no caso de ambas as profundidades estudadas. Considerando a sucção correspondente nas curvas características

cobertura das células C, CV e REF, à umidade residual, ou até mesmo inferior, no caso da célula BC.

As Figuras 4.18 e 4.19 evidenciaram uma variação relativamente baixa dos valores de umidade de todas as células experimentais ao longo do tempo. Apesar desta baixa variação, é possível observar que houve resposta à incidência das chuvas. Esta resposta ocorreu de forma similar em ambas as profundidades, o que indica ocorrência de infiltração. Para os sensores em coberturas convencionais a resposta foi maior do que os sensores na barreira capilar, os quais revelaram uma menor umidade em ambas as profundidades, durante todo o período.

A camada protetora de vegetação presente durante todo o período condicionou a uma variação um pouco menor de umidade do que a cobertura sem essa camada. A faixa de umidade para o solo da célula CV variou dentro de 0,10 $m^3.m^{-3}$ a pouco mais de 0,25 $m^3.m^{-3}$ na profundidade mais próxima à superfície, enquanto na camada inferior (0,40 m), a umidade do solo alcançou pouco mais de 0,25 $m^3.m^{-3}$. Portanto, este tipo de camada apresentou níveis mais baixos de umidade para a profundidade de 0,20 m do que na profundidade maior (0,40m).

Albright et al. (2004) investigando coberturas do tipo convencional, vegetadas, concluíram que o comportamento da camada varia em resposta ao desenvolvimento da vegetação e do perfil de formação do solo. Os autores mencionam que os primeiros 6 meses, foi caracterizado pela alta taxa de percolação e elevado armazenamento de umidade antes de a vegetação se instalar. Nos meses seguintes observou-se uma pequena infiltração em função do rápido desenvolvimento da vegetação e da secagem do perfil do solo devido à transpiração. No final do período monitorado, o perfil do solo continuou com baixas umidades devido seca e a transpiração das plantas, com taxas de infiltração semelhantes às apresentadas nos primeiros 6 meses de monitoramento.

resposta expressiva à incidência das chuvas. Esta resposta ocorreu de forma similar em todas as células experimentais.

Os resultados indicaram que na maior parte do período o menor nível de umidade ocorreu na cobertura convencional C´, que recebeu o solo “B”, apesar de no mês de março não poder se contar com os dados desta célula. A tendência, entretanto, não era de haver alteração neste comportamento.

Uma possível razão para este melhor desempenho está relacionada com o fato de a cobertura C’ ser um ano mais nova. É possível verificar que todas as outras coberturas apresentaram uma piora de desempenho, provavelmente devido à degradação, em maior ou menor nível dependendo da cobertura. Por exemplo, durante a etapa principal, a faixa de variação da umidade volumétrica da célula CV foi de 0,10 $m^3.m^{-3}$ a pouco mais de 0,25 $m^3.m^{-3}$ na profundidade 0,20 m. Na etapa complementar, a faixa mudou para 0,05 $m^3.m^{-3}$ a 0,50 $m^3.m^{-3}$, considerando a mesma profundidade.

Uma outra hipótese seria o efeito do próprio solo “B”, ou seja, é possível que seja um material de melhor característica para cobertura, uma vez que os resultados do ensaio de compactação foram melhores do que os do solo “A”, apesar de a maioria dos resultados de caracterização geotécnica e parâmetros hidráulicos não indicarem diferença entre os dois solos.

Para focar a variação da umidade do solo em intervalos menores de tempo, foram selecionados dois períodos chuvosos e elaboradas as Figuras 4.22 e 4.23 que corresponderam aos intervalos de 31/01/15 23:30h a 01/02/15 14:30h e 06/02/2015 11:00h a 08/02/2015 23:30h, respectivamente. Ressalta-se que no primeiro intervalo de tempo a umidade do solo iniciou em baixo nível, enquanto no segundo intervalo a umidade era bem maior no seu início.

variações encontradas no estudo está na Figura 4.26. Os autores encontraram influência da temperatura dos resíduos sobre a da cobertura. Além disso, ressaltaram no estudo que a variação da temperatura com a profundidade segue a teoria de transferência de calor em solos.

Temperaturas elevadas afetam adversamente as coberturas por favorecer o ressecamento que causa o indesejável aparecimento de fendas e rachaduras (KOERNER, 2005). Faixas de variação elevadas de temperatura associadas a ciclos de secagem e umedecimento igualmente promovem estes efeitos (YESLIER et al., 2008). O elevado nível de rachaduras encontrado no estudo, sobretudo na cobertura convencional, confirma que a faixa de variação de temperatura verificada foi elevada durante o período de monitoramento.

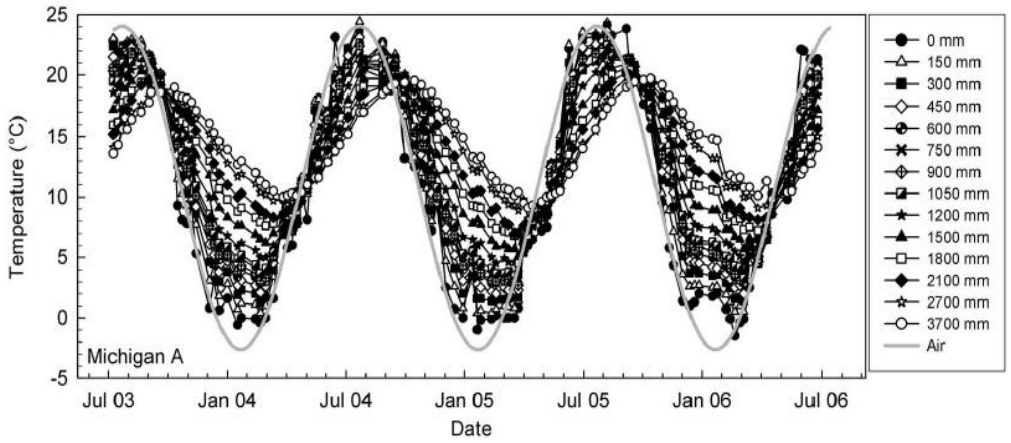

Figura 4.26: Exemplo de variação da temperatura em cobertura estudada de um aterro em Michigan, em diferentes profundidades (YESLIER et al., 2008).

4.5.2.2 Resultados do monitoramento da temperatura do solo na etapa complementar

A Figura 4.27 apresenta uma visão geral da variação da temperatura do solo nas células C, CV, BC e C´, a 0,20m de profundidade, no período 31/12/14 a 24/04/15. Os dados de chuva do período também estão inseridos.

A faixa de variação das sucções no período de monitoramento foi a seguinte: no primeiro par de tensiômetros: a 0,20m, 1 a 30 kPa, enquanto que a 0,40m, 5 a 55 kPa; no segundo par de tensiômetros: a 0,20m, 1 a 30 kPa, enquanto que a 0,40m, 0 a 35 kPa.

Em um par observou-se a existência de gradiente de potencial no perfil do solo ao longo do tempo, mas no outro observa-se muito pouco gradiente, sugerindo que ambas as profundidades do solo empregado nas coberturas nas quais os instrumentos foram instalados (0,20m e 0,40m) se encontravam no mesmo nível de umidade.

Os valores de sucção no período deixaram dúvidas sobre o correto funcionamento do tensiômetro. A faixa de umidade do solo obtida pelos sensores instalados na célula REF variou de 0,15 a 0,30 $m^3.m^{-3}$ na profundidade 0,20m (Figura 4.21) e 0,10 a 0,30 $m^3.m^{-3}$ na profundidade 0,40m (Figura 4.22). A curva característica do solo obtida em laboratório para esta célula (Figura 4.9) indica que para esta faixa de umidade a sucção deveria se encontrar abaixo da umidade residual obtida neste caso a 1500 kPa. O máximo obtido entre os tensiômetros foi cerca de 55 kPa. Portanto, apesar dos resultados ao longo do tempo mostrarem-se coerentes, os valores tornaram-se suspeitos. A capacidade de medição do tensiômetro é limitada a 85 kPa.

Foram tentadas algumas correlações entre os valores obtidos de sucção com os de umidade do sensor de umidade mais próximo a cada tensiômetro, entretanto os dados não tiveram correlação aceitável.

Diante destes resultados, optou-se por assumir que os dados de umidade obtidos pelos sensores e as curvas características em laboratório eram mais confiáveis e por isso o uso dos tensiômetros foi descontinuado na etapa complementar.

4.5.4 Medição da infiltração

4.5.4.1 Resultados da medição da infiltração na etapa principal

quando as chuvas são intensas. Conclusão similar já havia sido realizada por Catapreta (2008), que estudando o desempenho de barreiras capilares em um aterro experimental, constatou que as barreiras capilares não apresenta infiltração no início do processo, porém quando ocorre o que denominou de “ponto de invasão”, o potencial gravitacional governa o fluxo e rapidamente o líquido percola para as camadas subjacentes.

4.5.4.2 Resultados da medição da infiltração na etapa complementar

A Figura 4.31 apresenta o resultado da medição da infiltração pelos lisímetros confeccionados manualmente. Novamente, os resultados de CV não foram incluídos, porque continuaram igualmente nulos. A fim de verificar a coerência dos resultados, foi elaborada a Figura 4.32, que considera a precipitação acumulada até o final do período. Por ela pode ser observado que ao final do período os lisímetros coletaram quantidades compatível com a quantidade total de chuvas.

Os resultados deste período de medição indicaram que a barreira capilar apresentou uma quantidade inferior de infiltração do que a cobertura convencional. Em ordem de melhor desempenho para o pior, neste caso, temos: CV > BC > C.

autor, rachaduras provocadas pelo ressecamento são responsáveis pela ocorrência de fluxo preferencial, podendo aumentar o fluxo em uma ordem de magnitude.

Ciclos de temperatura e umidade elevados, tais como os observados neste estudo, favorecem o aparecimento destes danos às coberturas.

4.6.1.2 Resistência da vegetação durante o período

Considerando as condições adversas ao estabelecimento e desenvolvimento da vegetação, observou-se o desenvolvimento e capacidade de permanência da grama utilizada na camada convencional vegetada. Apesar de não ser uma espécie voltada para este tipo de utilização, verificou-se como satisfatório o seu desempenho considerando apenas a etapa principal (um ano de monitoramento). A Figura 4.37 presenta fotos da situação da grama em diferentes épocas. Observa-se na Figura 4.37c, no mês de maio de 2014, final da estação chuvosa, a vegetação estava bem formada. Com a entrada da estação seca, a grama foi afetada. Já no final desta fase, a cobertura de grama apresentava muitas falhas.

Santos (2012) estudou a sobrevivência de quatro capins e da grama tipo “Bermuda” e concluiu que as espécies apresentaram sobrevivência sobre o solo do aterro sanitário, porém com indicadores de desenvolvimento vegetal menores em relação a literatura, contribuindo para isso o efeito negativo da extrema compactação da cobertura e o baixo grau de fertilidade do solo.

De qualquer maneira, mesmo com as falhas, as medições de umidade da etapa complementar indicaram a manutenção do padrão de desempenho anterior. Supõe-se que presença de raízes mortas ou vivas mantém o efeito protetor da cobertura.

De acordo com a simulação, a barreira capilar resultou um runoff em pouco menor nível do que o verificado na cobertura convencional, refletindo a saturação na superfície apresentada na Figura 4.45

Com relação à variação da umidade volumétrica do solo apresentada na Figura 4.48, observa-se que houve uma manutenção de um nível baixo de umidade por um tempo maior do que na cobertura convencional, o que foi verificado também com os dados de campo. Com relação à variação da temperatura do solo apresentada na Figura 4.49, de igual forma houve uma diferença de comportamento em relação à cobertura convencional, refletindo o baixo nível de umidade ocorrido. Entretanto, os dados de campo não acompanharam a ordem de valores de temperatura gerada pela simulação numérica.

4.7.3 Cobertura convencional vegetada

A Figura 4.50 apresenta o balanço hídrico gerado no VADOSE/W para a cobertura convencional vegetada (célula CV). Apesar da existência do runoff no balanço hídrico, o programa não gerou gráfico de runoff, possivelmente devido à existência da vegetação. A Figura 4.51 apresenta a ocorrência da saturação na superfície no mesmo nível que as demais coberturas.

As Figuras 4.52 e 4.53 apresentam a variação da umidade e da temperatura do solo, respectivamente, na profundidade 0,20m.

Os resultados de simulação numérica indicaram que as coberturas proporcionam baixo nível de infiltração, nas condições do solo local e com os dados climáticos de novembro de 2013 a agosto de 2014.

Com exceção do comportamento da umidade do solo na barreira capilar, em geral os resultados da simulação numérica apresentaram pouca semelhança com os resultados reais de campo, reforçando a dificuldade de simular neste tipo de condição. A simulação numérica não consegue prever os danos causados pelo ressecamento das coberturas.

4.8 Desempenho das camadas de cobertura estudadas

Com base nos resultados obtidos dos parâmetros hidráulicos do solo e das investigações de campo são apresentadas discussões sobre o desempenho das coberturas estudadas.

Um dos parâmetros mais importantes na avaliação de desempenho é a taxa de infiltração. Esta pode ser calculada considerando o volume coletado em função do intervalo de tempo de cada medição.

Além disso, os dados de umidade do solo podem ser utilizados para o cálculo da taxa de infiltração da camada específica em que estiverem instalados. Pela variação da umidade no tempo e no perfil, é possível estimar a variação da taxa específica do fluxo de uma determinada camada aplicando a equação da continuidade (CABRAL et al., 2007):

$$\Delta q = -\Delta\theta * \frac{\Delta z}{\Delta t} \qquad (12)$$

Onde Δq é a taxa de infiltração, $\Delta\theta$ é a variação de umidade volumétrica do solo, Δz /Δt é a variação de distância vertical em dado intervalo de tempo.

Tabela 4.13: Taxa de infiltração obtida a partir dos volumes coletados nos lisímetros instalados na cobertura convencional

Data de coleta	Intervalo de dias	Taxa de infiltração ($mm.h^{-1}$)
05/03/14	-	-
11/04/14	36	$8,2 \times 10^{-4}$
22/04/14	41	$1,1 \times 10^{-4}$
13/05/14	21	$2,3\ 10^{-5}$
06/06/14	24	0
02/07/14	26	$5,6 \times 10^{-5}$
07/08/14	36	$3,4 \times 10^{-5}$
10/02/15	-	-
03/03/15	21	$6,9 \times 10^{-2}$
26/03/15	23	$6,1 \times 10^{-2}$
24/04/15	29	$5,0 \times 10^{-2}$

Considerando os valores de Ksat apresentados na Tabela 4.9, a média para a célula convencional resultou em 8,4 $mm.h^{-1}$. Portanto, considerando o último volume coletado, por exemplo, a infiltração entre os dias 26/03/15 e 24/04/15 ocorreu a uma taxa de 0,6% da condutividade hidráulica saturada.

Adicionalmente, os valores de umidade volumétrica obtidos através dos dataloggers ao intervalo fixo de meia hora, na profundidade 0,20m, foram utilizados para verificar a taxa de infiltração. A Figura 4.57 apresenta a variação da taxa de infiltração calculada a partir da Equação 12. O período utilizado foi o dos dias 31/01 e 01/02/2015, nos quais ocorreram chuvas de 9,0mm e 2,0mm, respectivamente.

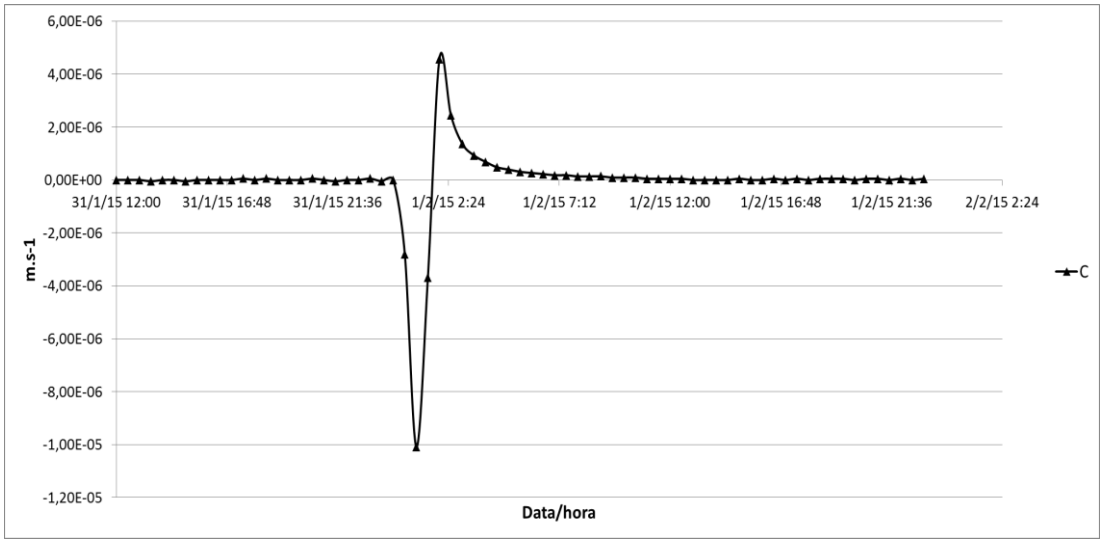

Figura 4.57: Variação da taxa de infiltração a partir de valores de umidade obtidos por sensores a 0,20m de profundidade na célula experimental da camada convencional entre os dias 31/01 e 01/02/2015, em intervalos de 30 minutos

A variação da taxa de infiltração apresentada na Figura 4.57 no momento da entrada de água no solo indicou que o fluxo da água ocorreu a uma taxa da ordem de 10^{-5} a 10^{-6} $m.s^{-1}$.

A Tabela 4.14 foi elaborada para comparar as taxas de infiltração obtidas pelos diferentes métodos citados.

Tabela 4.14: Valores de taxa de infiltração obtidos de dados de diferentes origens relacionados à cobertura convencional

Origem dos dados	Dados de umidade do solo entre 0,20 e 0,40m	Simulação numérica	Medição direta (lisímetros)	Dados de umidade a 0,20 e a intervalos fixos
Taxa de infiltração	$2,2x10^{-8} m.s^{-1}$	10^{-3} $m.dia^{-1}$	10^{-5} a $5x10^{-2}$ $mm.h^{-1}$	10^{-5} a 10^{-6} $m.s^{-1}$

Uma informação relevante utilizada para avaliação de desempenho de coberturas é a infiltração acumulada e sua relação com a precipitação anual. Durante o período de um ano de monitoramento da etapa principal, na cobertura convencional foi coletado um total de aproximadamente 1mm, que corresponde a 0,092% da precipitação anual (1079,0mm no período). Entretanto, devido à piora das condições de integridade da cobertura já anteriormente mencionada, foi coletado um total de aproximado de 137 mm, que corresponde como não corresponde ao período de um ano com suas variações climáticas, considerou-se não ser possível fazer uma comparação.

4.8.1.1 Efeito do tipo de solo utilizado na cobertura convencional

Apesar de o solo “B” empregado na cobertura convencional C’ ser classificado como mesmo tipo de solo do solo “A”, apresentando diversas semelhanças em termos de atributos geotécnicos e hidráulicos, em termos de compactação apresentou melhor desempenho em laboratório. Entretanto, o seu desempenho na etapa complementar, não foi superior, dados os resultados similares obtidos pelos iguais lisímetros instalados nas coberturas C e C´.

4.8.2 Barreira capilar

A Figura 4.58 apresenta a variação da umidade do solo medida pelos pares de sensores instalados., ao longo do período de um ano de monitoramento da etapa principal na barreira capilar

apresentados na Figura. A ordem de valores, entretanto, correspondeu aos dados reais, em torno de 0,002m/dia (que corresponde à 10^{-8}m.s^{-1}).

Com relação aos volumes coletados, a Tabela 4.15 apresenta a taxa de infiltração coletada a partir destes resultados de medição direta da infiltração.

Tabela 4.15: Taxa de infiltração obtida a partir dos volumes coletados nos lisímetros instalados na barreira capilar

Data de coleta	**Intervalo de dias**	**Taxa de infiltração (mm.h^{-1})**
05/03/14	-	-
11/04/14	36	7,9 x 10^{-3}
22/04/14	41	2,0 x 10^{-3}
13/05/14	21	49,4x 10^{-3}
06/06/14	24	0
02/07/14	26	0
07/08/14	36	1,0 x 10^{-3}
10/02/15	-	-
03/03/15	21	5,8 x 10^{-2}
26/03/15	23	6,9 x 10^{-2}
24/04/15	29	1,0 x 10^{-3}

Ressalta-se que em 2015 houve um aumento da taxa de infiltração da ordem de 10 vezes, que pode ser um efeito da degradação da cobertura ao longo do tempo.

Adicionalmente, os valores de umidade volumétrica obtidos através dos *dataloggers* ao intervalo fixo de meia hora, na profundidade 0,20m, foram utilizados para verificar a taxa de infiltração. A Figura 4.61 apresenta a variação da taxa de infiltração calculados a partir da Equação 12. O período utilizado foi o dos dias 31/01 e 01/02/2015, nos quais ocorreram chuvas de 9,0mm e 2,0mm, respectivamente.

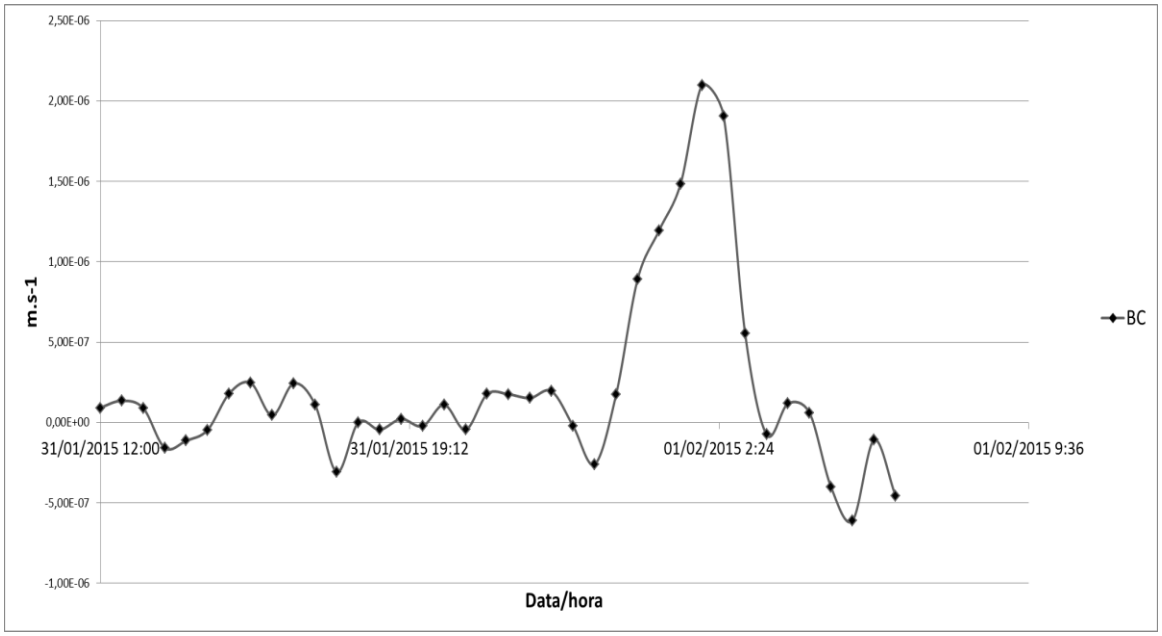

Figura 4.61: Variação da taxa de infiltração a partir de valores de umidade obtidos por sensores a 0,20m de profundidade na célula experimental barreira capilar entre os dias 31/01 e 01/02/2015, em intervalos de 30 minutos

A variação da taxa de infiltração apresentada na Figura 4.61 no momento da entrada de água no solo indicou uma variação dos valores da ordem de 10^{-6} $m.s^{-1}$ e 10^{-7} $m.s^{-1}$, menor do que no caso da cobertura convencional. Estes valores indicam que foi igualado o valor de K_{sat} (2,87 $x10^{-6}$ $m.s^{-1}$) que passou a governar o fluxo por pelo menos 3 horas, de acordo cam a figura.

Ressalta-se novamente o aumento da taxa de infiltração em relação à etapa preliminar, da ordem de 10 a 100 vezes, confirmando que houve piora nas condições de integridade da cobertura.

A Tabela 4.16 foi elaborada para comparar as taxas de infiltração obtidas pelos diferentes métodos.

Tabela 4.16: Valores de taxa de infiltração obtidos de dados de diferentes origens relacionados à barreira capilar

Origem dos dados	Dados de umidade do solo entre 0,20 e 0,40m	Simulação numérica	Medição direta (lisímetros)	Dados de umidade a 0,20 e a intervalos fixos
Taxa de infiltração	10^{-8} m.s^{-1}	10^{-3} m.dia^{-1}	10^{-2} a 10^{-3} mm.h^{-1}	10^{-6} a 10^{-7} m.s^{-1}

4.8.3 Cobertura convencional vegetada

A Figura 4.62 apresenta a variação da umidade do solo ao longo do período de um ano de monitoramento da etapa principal na cobertura convencional com grama.

Tabela 4.17: Taxa de infiltração obtida a partir dos volumes coletados nos lisímetros instalados na cobertura convencional

Data de coleta	**Intervalo de dias**	**Taxa de infiltração ($mm.h^{-1}$)**
05/03/14	-	-
11/04/14	36	0
22/04/14	41	0
13/05/14	21	0
06/06/14	24	0
02/07/14	26	0
07/08/14	36	0
10/02/15	-	-
03/03/15	21	0
26/03/15	23	0
24/04/15	29	0

Conforme já mencionado, não coletou-se água proveniente do lisímetro da célula CV em nenhum momento.

Por fim, os valores de umidade volumétrica obtidos a cada meia hora através dos dataloggers foram utilizados para verificar a taxa de infiltração, apresentada na Figura 4.65.

Tabela 4.18: Valores de taxa de infiltração obtidos de dados de diferentes origens relacionados à barreira capilar

Origem dos dados	Dados de umidade do solo entre 0,20 e 0,40m	Simulação numérica	Medição direta (lisímetros)	Dados de umidade a 0,20 e a intervalos fixos
Taxa de infiltração	10^{-8} m.s^{-1}	10^{-3} m.dia^{-1}	0	10^{-5} a 10^{-6} m.s^{-1}.

Os valores de taxa de infiltração obtidos por diferentes formas e dados, apresentaram diferenças em alguns casos significativas. Utilizando como exemplo os resultados da cobertura convencional e transformando todos os dados para uma mesma unidade (m.s-1), visualiza-se melhor as diferenças nas taxas de infiltração:

1- Dados de umidade do solo entre 0,20 e 0,40m: 2,2x10^{-8}m.s^{-1}

2- Por simulação numérica: 1,35x10^{-8} m.s^{-1}

3- Por medição direta: 1,39x10^{-8}m.s^{-1} (considerando última medição)

4- Através de dados de umidade a 0,20 e a intervalos fixos: 10^{-5} a 10^{-6} m.s-1

(Ksat na cobertura convencional: 4,84x10^{-6}m.s^{-1} no início; 2,24x10^{-6} m.s^{-1} após 16 meses de monitoramento)

Ressalta-se que nem todos os dados utilizados referem-se ao mesmo momento. Em (1) e (2) os dados referem-se ao período da etapa principal, enquanto em (4) refere-se à etapa complementar. A medição pelos lisímetros (3) refere-se as duas etapas.

Um dos motivos para a diferença entre os valores obtidos pode estar relacionado aos momentos distintos nos quais os dados utilizados para o

cálculo foram gerados. O aumento da taxa de infiltração, atribuído à piora das condições de integridade da cobertura, pode ser admitido de considerarmos as taxas de infiltração em (1) e (2), por exemplo, já que referem-se a momentos distintos. Esta tendência de aumento da taxa é verificada considerando somente os dados de medição dos lisímetros mostrados na Tabela 4.13, segundo os quais em 2014 a taxa de infiltração apresentou valores da ordem de 10-5 mm.h-1 e em 2015, 10-2 mm.h-1.

Outro ponto a ser salientado, é a questão da simulação nem sempre conseguir representar com precisão a condição real do campo, o que certamente ocorreu neste estudo, principalmente considerando a presença de fendas e rachaduras existente nem condições reais, não abrangidas em uma simulação.

A taxa de infiltração a partir dos dados obtidos dos lisímetros também promoveram dúvidas, considerando os problemas de confiabilidade dos resultados de medição destes instrumentos, conforme discussão apresentada em 4.5.4.1.

Diante destes diferentes resultados, considerou-se mais adequados para representar a taxa de infiltração das coberturas os que se basearam no uso da Equação 12.

4.9 Comparação do desempenho entre os tipos de cobertura estudados

Os resultados da comparação de desempenho entre as coberturas estudadas estão resumidos no Quadro 4.1.

Quadro 4.1: Informações de fatores relacionados ao desempenho de coberturas estudadas, pesos e notas

Fator	C	BC	CV	Peso
Condutividade hidráulica saturada ($m.s^{-1}$), resultados de laboratório	$4,84x10^{-6}$ no início; $2,24x10^{-6}$ após 16 meses de monitoramento **NOTA: 2**	$6,35x10^{-7}$ no início; $2,87x10^{-6}$ após 16 meses de monitoramento **NOTA: 1**	$2,36x10^{-6}$ no início; $4,23x10^{-6}$ após 16 meses de monitoramento **NOTA: 2**	2
Faixa de variação da umidade durante um ano ($m^3.m^{-3}$)	0,10 a 0,30 a 0,20m de prof.; 0,15 a 0,32 a 0,40m de prof. (Θs = 0.50 a 0.60) **NOTA: 3**	0,10 a 0,20 a 0,20m de prof.; 0,05 a 0,20 a 0,40m de prof. (Θs = 0.50 a 0.60) **NOTA: 3**	0,10 a 0,20 a 0,20m de prof.; 0,10 a 0,26 a 0,40m de prof. (Θs = 0.50 a 0.60) **NOTA: 3**	1
Taxa de Infiltração ($m.s^{-1}$)	10^{-8} na etapa principal; 10^{-5} a 10^{-6} na etapa complementar **NOTA: 2**	10^{-8} na etapa principal; 10^{-6} a 10^{-7} na etapa complementar **NOTA: 2**	10^{-8} na etapa principal; 10^{-6} a 10^{-7} na etapa complementar **NOTA: 2**	1
Infiltração acumulada anual	Aprox.. 1 mm a etapa principal (<3% da pp anual) **NOTA: 3**	Aprox.. 36 mm na etapa principal (<3% da pp anual); **NOTA: 3**	Não foi coletada nenhuma infiltração nos períodos (<3% da pp anual) **NOTA: 3**	3
Manutenção da integridade da cobertura	Muitas fendas e rachaduras; K_{sat} se manteve com o tempo **NOTA:1**	Poucas rachaduras; K_{sat} aumenta com o tempo **NOTA:1**	Superfície bem coesa sob as raízes; K_{sat} se manteve com o tempo **NOTA:3**	3

A barreira capilar, mesmo nas condições de baixa precipitação acabou não se mostrando a melhor opção em termos de alternativa à cobertura convencional. Uma hipótese para o desempenho observado para esta cobertura tem relação com o material empregado sobre a camada de areia, que para proporcionar um adequado efeito de barreira capilar, por definição, deve ser de textura fina. A análise granulométrica, entretanto, demonstrou que o solo empregado apresenta um alto ter de areia (por volta de 60%). Apesar

disso, as observações do monitoramento da umidade, sobretudo durante a etapa preliminar (item 4.5.1.1) sugerem que o efeito de barreira capilar efetivamente ocorreu.

De acordo com o as notas atribuída aos fatores para cada cobertura, a pontuação final de cada uma delas ficou sendo:

- ✓ Cobertura convencional: **21** (2x2 + 3x1 + 2x1 + 3x3 + 1x3)
- ✓ Barreira capilar: **19** (1x2 + 3x1 + 2x1 + 3x3 + 1x3)
- ✓ Cobertura convencional vegetada: **27** (2x2 + 3x1 + 2x1 + 3x3 + 3x3)

Com a confirmação do melhor desempenho, o efeito benéfico da vegetação sobre a cobertura além de visualmente perceptível, pôde ser de uma certa forma mensurado. Ressalta-se que a grama, por não ser uma espécie indicada para as condições locais tende a ter um efeito não duradouro. Outras espécies de forrageiras devem ter melhor adaptação e potencializar as vantagens da utilização da camada protetora de vegetação.

No presente estudo a vegetação condicionou à cobertura convencional, além da proteção contra o ressecamento do solo e suas consequências danosas, vantagens relacionadas à estrutura e propriedades hidráulicas do solo. Adicionalmente, a vegetação pode conferir outros benefícios sobre a cobertura convencional, dentre os quais são citados:

- ➢ Proteção contra erosão;
- ➢ Inclusão do componente evapotranspiração no balanço hídrico (mesmo que superficialmente por ser cobertura convencional, ou seja, integralmente compactada)
- ➢ Modificação favorável do microclima;
- ➢ Benefícios de ordem paisagística

Se faz importante ressaltar que a cobertura empregada na área dentro do aterro de Seropédica utilizada para o estudo não representava uma cobertura final, assim como na maioria da área, por não ter sido atingida a altura máxima de resíduos estabelecida. Entretanto, no estudo foi possível verificar que as alterações nas propriedades hidráulicas da cobertura vinculadas ou não ao aparecimento de fendas e rachaduras ocorreram com um

ano ou até menos, no caso dos danos por ressecamento. Uma cobertura intermediária pode permanecer como tal por tempo superior a um ano e as consequências de uma cobertura ineficiente para o meio em que o aterro está inserido devem ser prioritariamente evitadas.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base nos resultados obtidos, as seguintes conclusões são apresentadas:

- Em relação aos fatores-chave comuns em projetos e monitoramento de sistemas de cobertura, o desempenho da barreira capilar nas condições pluviométricas locais e utilizando o solo local foi inferior ao sistema convencional de cobertura.
- A inclusão da camada protetora de vegetação na cobertura convencional promoveu melhora em seu desempenho.
- A quantidade de água infiltrada foi maior na cobertura do tipo barreira capilar do que na cobertura convencional, nas condições pluviométricas locais e utilizando o solo local.
- O solo local quando saturado apresentou condutividade hidráulica similar em todos os sistemas de cobertura, da ordem de 10^{-6}m.s^{-1}, com tendência a aumento ao longo do tempo. Os valores encontrados considerando coberturas intermediárias estão aquém do requerido para coberturas finais de acordo com referências internacionais.
- A cobertura do tipo convencional e a barreira capilar apresentaram danos por ressecamento (fendas e rachaduras) com aumento progressivo ao longo do tempo. A camada protetora de vegetação atuou eficazmente para inibir estes danos sobre a cobertura convencional.
- Os resultados de simulação numérica pelo software VADOSE/W indicaram que as coberturas proporcionam baixo nível de infiltração, nas condições do solo local e com os dados climáticos de novembro de 2013 a agosto de 2014. Entretanto os resultados da simulação numérica não se assemelharam com os da realidade, pois não conseguem prever os danos causados pelo ressecamento das coberturas.
- Um segundo tipo de solo local (solo “B”), visualmente diferente foi apresentado pelo aterro, entretanto apresentou características geotécnicas e

hidráulicas semelhantes ao primeiro solo estudado (solo “A”), com exceção de características de compactação. Consequentemente, seu desempenho foi similar ao solo . Desta forma, não foi possível avaliar o efeito de empregar um solo distinto ao local na cobertura convencional

5.1 Recomendações

- Avaliar outras formas de vegetação com maior potencial de desenvolvimento e permanência nas condições do aterro, além de baixo custo para ser empregada como camada protetora da cobertura do aterro, mesmo que seja intermediária.

- Devido à importância da manutenção da integridade e do desempenho necessário da cobertura por longo tempo, é desejável períodos maiores de estudos (pelo menos alguns anos). A condutividade hidráulica poderia ser monitorada ao longo do tempo.

- Avaliar a possibilidade de realizar um ensaio de condutividade hidráulica do solo não saturado em campo

- Avaliar outros softwares com melhor desempenho para realizar simulação numérica das coberturas nas condições de solo e pluviosidade locais

- Avaliar instrumentos e sistemas para medição da infiltração de coberturas em aterros

- Estudar melhor a compactação dos solos empregados nas coberturas convencionais, incluindo realizar vários ensaios de massa específica aparente em campo

- Estudar a atuação da biota do solo em conjunto com as raízes da vegetação em prol da melhoria na estrutura do solo empregado como cobertura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento .Rio de Janeiro, 1992.

_____.**NBR 10.004**: Resíduos sólidos – classificação, Rio de Janeiro, 2004.

_____ **NBR 7181:** Solo – Análise Granulométrica Rio de Janeiro, 1984

_____ **NBR 6459**:Solo – Determinação do Limite de Liquidez Rio de Janeiro, 1984.

_____ **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade Rio de Janeiro, 1984.

_____ **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1986.

_____ **NBR 6457**: Amostra de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ALBRIGHT, W.H. & BENSON, C.H. Alternative Cover Assessment Program 2002 Annual Report. **US EPA Publication** n. 41182. 48 p. 2002.

ALBRIGHT, W. H., BENSON, C. H., GEE, G. W., ROESLER, A. C., ABICHOU, T., APIWANTRGOON, P., LYLES, B. F. AND ROCK, S. A. Field water balance of landfill final covers. **Journal of Environmental Quality**, v.33, p.2317 – 2332. 2004.

ALBRIGHT W H.; BENSON, C. H., GEE, G. W; ABICHOU, T., ROCK, S. A.. Field Performance of Three Compacted Clay Landfill Covers. **Vadose Zone Journal**, v. 5, p.1157–117. 2006.

ALBRIGHT W H; BENSON, C.H., WAUGH, W.J., **Water Balance Covers for Waste Containment; Principals and Practice.** Reston: American Society of Civil Engineers, 2010. 144 p.

ALBRECHT, B.A. & BENSON, C.H. Effect of desiccation on compacted natural clays. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.127 n.9, p.67-75, 2001

APIWANTRAGOON, P. "Field hydrologic evaluation of final covers for waste containment. Wisconsin, 2007. Ph.D. thesis, Univ. of Wisconsin, Madison, Wis. 2007.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **ASTM D 5298**, Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. Pennsylvania, 2003.8p.

BARNSWELL, K.D., DWYER, D.F.,. Assessing the performance of evapotranspiration covers for municipal solid waste landfills in northwestern Ohio. **Journal of Environmental Engineering** 137 (3), 301–305. 2011

BARTH, C., AND WOHNLICH, S. Proof of effectiveness of a capillary barrier as surface sealing of sanitary landfill. In: 7th INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 1999. S. Margherita di Pula - Cagliari, Sardinia, Italy, CISA: Environmental Sanitary Engineering Centre, v.3, p.389-392.

BENSON, C. H., & OTHMAN, M. A. 1993 . Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ. **J. Geotech. Engrg**., v.119, n. 2 , p.276–294.

BENSON, C. H. & KHIRE, M. V., Earthen Covers for Semiarid and Arid Climates, Landfill Closures – Enviromental Protection and Land Recovery. In: DUNN, R. J.; UDAI, P. S. (Eds.) Geothecnical Special Publication Number 53. New York: ASCE, p. 201-217, 1995.

BENSON, C. & GRIBB, M.. Measuring unsaturated hydraulic conductivity in the laboratory and field. Unsaturated Soil Engineering Practice, GSP No. 68, ASCE, Houston, S.and Fredlund, C., Eds., p.113-168. 1997.

BENSON, C. Liners and covers for waste containment, In: PROC. FOURTH KANSAI INTERNATIONAL GEOTECHNICAL FORUM, CREATION OF A NEW GEO-ENVIRONMENT, 2000. Japanese Geotechnical Society, Kyoto, Japan, 2000, p.1-40..

BENSON C.H. Waste containment: strategies & performance. **Australian Geomechanics**, 2001.

BENSON, C., ABICHOU, T., ALBRIGHT, W., GEE, G.; ROESLER, A. Field evaluation of alternative earthen final covers. **International Journal of Phytoremediation**. V.3, p.1–21. 2001.

BENSON, C. H. & CHEN, C. Selecting the thickness of monolithic earthen covers for waste containment. SOIL AND ROCK AMERICA 2003, P. J. Culligan, H. H. Einstein, and A. J. Whittle, eds., Verlag Glückauf GMBH, Essen, Germany, p.1397–1404. 2003.

BENSON, C. H., BOHNHOFF, G. L., APIWANTRAGOON, P., OGORZALEK, A. S., SHACKELFORD, C. D., ALBRIGHT, W. H. Comparison of model predictions and field data for an ET cover. PROC., TAILINGS AND MINE WASTE ’04, Balkema, Leiden, The Netherlands, p. 137–142. 2004 .

BENSON, C. H., BOHNHOFF, G., OGORZALEK, A. S., SHACKELFORD, C. D., APIWANTRAGOON, P., ALBRIGHT, W. H. Field data and model predictions for an alternative cover. **Waste containment and remediation**, A. Alshawabkeh et al., eds., ASCE, Reston, p.1–12. 2005 .

BENSON, C. H. & BAREITHER, C.. Designing Water Balance Covers for Sustainable Waste Containment : Transitioning State of the Art to State of the Practice. Geotechnical Engineering State of the Art and Practice, p.1-33. 2012.

BIZARRETA, J.C.O. & DE CAMPOS, T.M.P. Simulação numérica do fluxo em sistemas de barreiras capilares inclinadas usando o Vadose. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO-SATURADOS. Anais eletrônicos…Pirenópolis: 2011.

BRASIL. Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá

outras providências. Publicada no D.O.U. em 3.8.2010. Disponível em < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm> Acesso em: 18 set. 2010.

BUSSIÈRE, B., AUBERTIN, M., CHAPUIS, R. P. The Behaviour of Inclined Covers Used as Oxygen Barriers. **Canadian Geotechnical Journal** v. 40, p.512-535. 2003.

CABRAL, A., EL-GHABI, B.; PARENT, S-É.; MARINEAU, L.. Design And Performance Of Na Experimental Double Capillary Barrier Cover Placed In A Municipal Solid Waste Landfill In Quebec, Canada. In: PROCEEDINGS SARDINIA, ELEVENTH INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 1 - 5 Out 2007.

CAMPBELL, G. S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. **Soil Science** v.117, p. 311-314. 1974.

CAMPOS, T.C.M.P. Equipamentos e técnicas para determinação da sucção em campo. In: 2 SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, v.1. Anais... Recife, Ed. Universitária, 1994.

CAPELO NETO, J.; MOTA, S.; SILVA, F. J. A. Geração de percolado em aterro sanitário no semi-árido nordestino: uma abordagem quantitativa. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 4, n. 3, pp. 160-167, 1999

CASTILHOS JR. A. B.; ZANTA, V.M.; LANGE, L.C.; GOMES, L.P.; PESSIN, N. Resíduos Sólidos Urbanos: Aterros Sustentáveis para Municípios de Pequeno Porte (coletânea de trabalhos técnicos) Projeto PROSAB - RIMA, ABES. Rio de Janeiro. 294p., 2003.

CEPAGRI. **Vendavais. Relação entre velocidade do vento e danos.** Disponível em: http://www.cepagri.unicamp.br/artigos-especiais/vendavais.html. Acesso em 11.ago.2015.

COBOS, R.D. & CHAMBERS, C. Calibrating ECH2O Soil Moisture Sensors. Decagon Devices Application Note. 2010.

CORSER, P. & CRANSTON, M. (1991). Observations on the performance of composite clay liners and covers. In: PROCEEDINGS OF THE GEOSYNTHETIC DESIGN AND PERFORMANCE, VANCOUVER GEOTECHNICAL SOCIETY. Anais…Vancouver, BC, May 24, p. 16.

D'ALMEIDA, M. L. O.& VILHENA, A. Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. 2.ed. rev. ampl. São Paulo: IPT, 2000.

DWYER, S. Finding a Better Cover. **Civil Engineering**, v. 71, n.1, 58–63. 2001.

DEXTER, A.R. (2004). Soil physical quality. Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma,** v.120, p.227-239.

EL-FADEL, M., BOU ZEID, E., CHAHINE, W. & ALAYLI, B. Temporal Variation Leachate Quality from Pre-Sorted and Baled Municipal Solid Waste with High Organic and Moisture Content. **Waste Management**, v.22, pp. 269-282. 2002.

EPA. United States Environmental Protection Agency Fact Sheet on Evapotranspiration Cover Systems for Waste Containment. EPA-542-F-11-001, 26p. 2011.

FAYER, M., ROCKHOLD, M., AND CAMPBELL, M. Hydrologic modeling of protective barriers: comparison of field data and simulation results, **Soil Sci. Soc. of Am. J**., v.56, 690-700. 1999.

FELLNER, J., HUBER, R., DÖBERL, G., BRUNNER, P.H., 2003. Hydraulics of MSW landfills andits implications for water flow modelling. In: PROCEEDINGS OF THE SARDINIA, NINTH INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 6–10 October.

FERREIRA, M.A.S. **Aplicação de modelos de avaliação qualitativa e quantitativa dos percolados gerados em um aterro sanitário**. Rio de Janeiro, 2006, 212 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2006.

FREDLUND, D. G., XING, A. “Equations for the soil -water characteristic curve” **Can. Geotech. J.** v.31 p 521 -532. 1994.

FORBES, P.L. (1994). “Simple and accurate methods for converting centrifuge data into drainage and imbibition capillary pressure curves.” **The Log Analyst**. v.35, p.31–53.

GARDNER, W.H. 1986. Water content. In: KLUTE, A. ed. **Methods of soil analysis. Part I. Agronomy Monograph** Séries no 9, Madison, Winconsin, Cap. 21, p. 493-544.

GERSCOVICH D. M. S. & SAYÃO, A. S. F. J. Evaluation of the soil-water characteristic curve equations for soils from Brazil. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS - UNSAT2002, Anais…Recife, v.1, p295-300. 2002.

HAMADA, J. Estimativas de geração e caracterização do chorume em aterros sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997, Foz do Iguaçu. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 1997.

HAUSER, V.L. Evapotranspiration Covers for Landfills and Waste Sites. Boca Raton: CRC Press, 2009. 203p.

JONG VAN LIER, Q. & LIBARDI, P.L. Variabilidade dos parâmetros da equação que relaciona a condutividade hidráulica com a umidade do solo no método do perfil instantâneo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.23, p.1005-1014, 1999.

KAVAZANJIAN J.R., E & DOBROWOLSKI, J.G. Cost and Performance Evaluation of Alternative Final Covers. In: Proceedings Sardinia (2003), NINTH INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM Cd rom.Italy. 2003.

KHIRE, M. V.; BENSON, C. H.; BOSSCHER, P. J. Water balance modelling of earthen final covers, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, n.123, p.744-754. 1997

KHIRE, M. V., BENSON, C. H. AND BOSSCHER, P. J. Field data from a capillary barrier and model predictions with UNSAT-H, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 125: 518-527. 1999.

KHIRE, M., BENSON, C., BOSSCHER, P. Capillary Barriers in Semi-Arid and Arid Climates: Design Variables and the Water Balance. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, V. 126, No. 8, pp. 695–708. 2000

KIEL, R.E., CHADWICK, D.G., LOWREY, J.,MACKEY, C.V., GREER, L.M. Design of evapotranspirative (ET) covers at the Rocky Mountain Arsenal. In: PROCEEDINGS: SWANA 6TH ANNUAL LANDFILL SYMPOSIUM. 2002.

KOERNER, R. M. AND DANIEL, D. E. Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps, 1 ed. New York, 1997. ASCE PRESS.

LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. 2a edição. Piracicaba, 2000: o autor. 509p.

LOEHR, R.C. & HAIKOLA, B.M. Long-term landfill primary and secondary leachate production. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 11, p. 1063-1067. 2003.

LOPES, R.L.. Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. Recife, 2011, 250p. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. 2011

MADALINSKI, K.L.; GRATTON, D.N., WEISMAN, R.J. Evapotranspiration Covers: An Innovative Approach to Remediate and Close Contaminated Sites. **Remediation Winter**, p.55-67, 2003.

MARQUES, A.C.M.E. & VILAR, O.M., 2003. An analysis of the effects of compaction on the leachate generation in sanitary landfills. In: 14 SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS. 15 CONGRESSO BRASILEIRO GEOAMBIENTAL – REGEO, Anais...Porto Alegre- RS, p. 1–9.

MARQUES, J.D.O., TEIXEIRA, W.G., REIS, A.M., CRUZ JUNIOR, O.F., MARTINS, G.C. Avaliação da condutividade hidraulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. Acta Amazonica, v. 38, n.2, 2008 p.193 – 206.

MELCHIOR, S. In-situ studies of the performance of landfill caps (Compacted clay liners, geomembranes, geosynthetic clay liner, capillary barriers). **Land Contamination and Reclamation**, v.5, p.209–216. 1997.

MEERDINK, J.S., BENSON, C.H., KHIRE, M.V. Unsaturated hydraulic conductivity of two compacted barrier soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 122, p.565–576. 1996.

MIJARES, R. & KHIRE, M. Field Data and Numerical Modeling of Water Balance of Lysimeter versus Actual Earthen Cap. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, n.10, p.1061.2012.

MORRIS, C. E.; STORMONT, J. C. Capillary Barriers and Subtitle D Covers: Estimating Equivalency. **Journal of Environmental Engineering**, v. 123, n. 3, p. 3-10, 1997.

OGORZALEK, A., BOHNHOFF, G., SHACKELFORD, C., BENSON, C., AND APIWANTRAGOON, P. 2008 . Comparison of field data and water-balance predictions for a capillary barrier cover. **J. Geotech. Geoenviron. Eng**., v.134, n. 4 , p.470–486.

PADILLA, R.S.; SIMÕES, G.F.; CATAPRETA, C.A.A. Simulação da produção delixiviados em um aterro sanitário experimental utilizando o modelo computacional tridimensional MODUELO. 24º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL, Belo Horizonte: Anais... ABES, 2007.

PARENT, S.E & CABRAL, A.R. Design of Inclined Covers with Capillary Barrier Effect. **Geotechnical and Geological Engineering Journal**, v.24, p.689-710. (2006).

PENG, S. & JIANG, H. A review on soil cover in waste and contaminant containment: design, monitoring, and modeling. Front. **Earth Sci. China**, v.3,n.3, p. 303–311, 2009.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. Falling head soil core (Tank) method. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America,. pt. 4: Physical methods, 2002. p. 809-812.

RIBEIRO, A.G.C.; AZEVEDO, R.F.; AMORIM, N.R.; AZEVEDO, I.R. Field Performance and Numerical Analysis of Cover Systems. **EJGE**, V. 15, p. 1337-1352. 2010.

SANTOS, T. F. L.; BARROSO, I. ; VENTURA, M. A. ; RITTER, E. . Avaliação da camada de cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos com a utilização do modelo Vadose - Resultados Iniciais. In: 25 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2009, Recife. Anais ...ABES, 2009.

SÃO MATEUS, M.S.C.; MACHADO,S.L.; BARBOSA, M.C. An attempt to perform water balance in a Brazilian municipal solid waste landfill. **Waste Management** v.32 p.471–481. (2012)

SHACKELFORD C.D., CHANG, C.-K., AND CHIU, T.-F. "The capillary barrier effect in unsaturated flow through soil barriers." 1ST ICEG CONFERENCE. EDMONTON, CA, pp. 789–793. 1994.

SILVA, A.M. Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros. 2005. 136p. Dissertação (Mestrado) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005

SILVA, E.G.M. Estudo Experimental de gases em Camadas de Cobertura no Aterro Sanitário de Nova Iguaçu. Rio de Janeiro, 2011, 109 p Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2011.

SILVA, P.A.D. & VON SPERLING, E. Comportamento Hidráulico De Uma Barreira Capilar: Simulação Física Versus Numérica. In: 26º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Anais…Porto Alegre, 2011.

SIMÕES, G.F., CATAPRETA, C.A.A., BATISTA, H.P., MARTINS, H.L., 2003. Monitoring the liquid level into the sanitary landfill at BR-040, Belo Horizonte,MG. In: 14 SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS. 15 CONGRESSO BRASILEIRO GEOAMBIENTAL – REGEO. Anais... Porto Alegre, p. 1–8.

SOUZA, V.P., BORMA, L. S., MENDONÇA, R. M.G. “Projeto de coberturas secas para controle da drenagem ácida em depósitos geradores de acidez”. In: SEMINÁRIO BRASIL–CANADÁ DE RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DE ÁREAS MINERADAS, 2003. Anais…Florianópolis, 2003.

STORMONT, J. C. & ANDERSON, C. E. Capillary barrier effect from underlying coarser soil layer. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.125, n.8, 641-648. (1999).

SCHNABEL, W.E. MUNK, J; LEE, W.; BARNES, D. Four-year performance evaluation of a pilot-scale evapotranspiration landfill cover in Southcentral Alaska. **Cold Regions Science and Technology,** v**.** 82 p.1–7. (2012)

STARR, J.L., & PALTINEANU, I.C.. Methods for Measurement of Soil Water Content: Capacitance Devices. p. 463-474. In DANE, J.H., & TOPP, G.C. (ed.) Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc. 2002.

TEIXEIRA, C.F.; MORAES, S.O.; SIMONETI, M.A. Desempenho do tensiômetro, TDR e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo . **R. Bras. Ci. Solo**, v.29, p.161-168, 2005.

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. Gestão de resíduos sólidos geradores de drenagem ácida de minas com o uso de coberturas secas. Rio de Janeiro: Cetem/MCT, 2007.

VAN GENUCHTEN, M. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-898. 1980.

VEREDA, Relatório de impacto ambiental da Central de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Santa Rosa. 2009.

VIEIRA, S. R. Permeâmetro: novo aliado na avaliação de manejo do solo. **O Agronômico**, v.48, p.32-33. 1996.

WANG, X. & BENSON, C.H. Leak-free pressure plate extractor for the soil water characteristic curve. **Geotechnical Testing Journal**. v.27, p.1–10. 2004.

YESILLER, A.M.; HANSON, J.L.;. OETTLE, N.K., LIU, W.L. Thermal Analysis of Cover Systems in Municipal Solid Waste Landfills. **J. Geotech. Geoenviron. Eng.**.v.134:1655-1664. 2008

ZORNBERG, J. G., LAFOUNTAIN, L.; CALDWEL J. A. Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 6, p. 427 - 438, 2003

ZORNBERG, J.G. & MCCARTNEY, J.S. Chapter 34:Evapotranspirative Cover Systems for Waste Containment. In: DELLEUR, J.W. **The Handbook of Groundwater Engineering**, 2nd Edition, Boca Raton: CRC Press, 2007.p.34-1 – 34.31