

Capítulo 23

BARREIRAS CAPILARES EM COBERTURAS EVAPOTRANSPIRATIVAS

Marlon José de Lima
Jorge Gabriel Zornberg
Ennio Marques Palmeira

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de se prover um destino adequado aos resíduos sólidos gerados pela atividade humana tem sido, a longo prazo, uma preocupação da sociedade organizada e um desafio de engenharia na busca por soluções tecnicamente eficientes e economicamente viáveis. A seleção correta de áreas para disposição final de resíduos sólidos compreende a execução de um projeto de manejo que reduza os impactos ambientais negativos e aumente a vida útil das instalações. Outro desafio corrente é quanto ao projeto de cobertura final em células de aterros sanitários que tenham atingido sua capacidade máxima de armazenamento de resíduos. Para cobertura final em aterros sanitários, a prática comum no país tem sido a utilização de camadas de solo compactado, principalmente solos argilosos, uma vez que a principal preocupação é prover uma cobertura com baixa permeabilidade ao fluxo de água, evitando acréscimo de umidade à massa de resíduos.

O sistema de cobertura é um componente importante em um projeto de engenharia que contemple um bom acondicionamento de resíduos sólidos urbanos ou resíduos perigosos. O sistema de cobertura de um aterro está em constante interação com a atmosfera. Projetos de coberturas finais envolvem conceitos ligados a várias áreas do conhecimento, como a engenharia geotécnica, engenharia ambiental, ciências do solo, climatologia, biologia e hidrologia. A integração de conceitos dessas várias disciplinas é um importante desafio aos pesquisadores, projetistas e reguladores responsáveis. Este é particularmente o caso das coberturas evapotranspirativas, em que é necessária uma ampla compreensão e quantificação dos processos atmosféricos que atuam na superfície onde está localizado o sistema de cobertura, além do fluxo de água através da camada de solo não saturado (Zornberg & McCartney, 2007).

Os componentes do balanço hídrico usados para quantificar a conservação da massa de água em um projeto de cobertura pode incluir evaporação e transpiração plantar (conjunto denominado de evapotranspiração), precipitação, fluxo superficial (*runoff*), arma-

zenamento de umidade, drenagem lateral e percolação basal. Percolação basal, uma importante variável para quantificar o desempenho médio de um sistema de cobertura, é o volume de água que se localiza sob a superfície do sistema de cobertura com o tempo. O volume de água que não possa ser removido do sistema de cobertura por evapotranspiração ou drenagem lateral alcança a camada de resíduos sólidos acondicionada no sistema, possibilitando a mobilização de contaminantes que podem eventualmente alcançar o lençol freático. Portanto, um dos objetivos primários de um sistema de cobertura de aterros sanitários é controlar a percolação basal. Objetivos adicionais de um sistema de cobertura em depósitos de resíduos sólidos incluem acomodar recalques diferenciados sem comprometer seu desempenho e controlar a liberação de gás oriundo da decomposição do material armazenado.

Sistemas de cobertura resistivos envolvem um *liner* (por exemplo, uma camada de argila compactada) com baixa condutividade hidráulica saturada para reduzir a percolação basal. Em um sistema resistivo, a percolação basal é reduzida maximizando-se a percolação superficial (*runoff*).

Coberturas evapotranspirativas são sistemas alternativos que têm sido implementados com relativo sucesso nos últimos tempos. Coberturas evapotranspirativas são vegetadas com plantas nativas que sobrevivem tanto durante o período típico de precipitação quanto nos períodos de estiagem. Para esse sistema, a evapotranspiração e a capacidade de armazenamento de umidade são componentes que influenciam significativamente seu desempenho. A drenagem lateral interna pode ainda ser um componente relevante para alguns tipos de coberturas evapotranspirativas, como no caso das barreiras capilares. Uma cobertura evapotranspirativa não agindo como uma barreira, como no caso da barreira resistiva, mas como uma esponja ou um reservatório que armazena umidade durante eventos de precipitação e, então, elimina essa umidade de volta à atmosfera por evapotranspiração ou drenagem lateral. Siltes e argilas de baixa plasticidade são os solos mais comumente usados em coberturas evapotranspirativas.

1. TIPOS DE COBERTURAS EVAPOTRANSPIRATIVAS

1.1 Coberturas monolíticas

Coberturas monolíticas são coberturas evapotranspirativas que consistem em uma única camada de solo colocada diretamente sobre a camada de resíduo sólido (Zornberg *et al.*, 2003). A camada superior de solo trabalha tanto como um suporte à vegetação quanto uma barreira hidráulica natural à infiltração de água. Abaixo da camada superior de solo, é instalada uma camada de fundação, podendo consistir do mesmo tipo de solo. Essa camada está logo acima da camada de resíduos sólidos e tem função de nivelamento do sistema de cobertura.

Os primeiros pesquisadores focaram suas pesquisas na investigação do comportamento em longo prazo das camadas de solo natural em regiões áridas, assumindo que o comportamento é análogo ao observado em uma cobertura monolítica (Waugh *et al.*, 1994 *apud* Zornberg & McCartney, 2007). Esses estudos indicaram que as variações da umidade em estruturas de solo análogos se concentram nos primeiros centímetros da ca-

mada de solo, indicando que as coberturas monolíticas podem ser soluções aceitáveis para depósito de resíduos sólidos. A Figura 1 (Zornberg & McCartney, 2007) ilustra a configuração de uma cobertura monolítica.

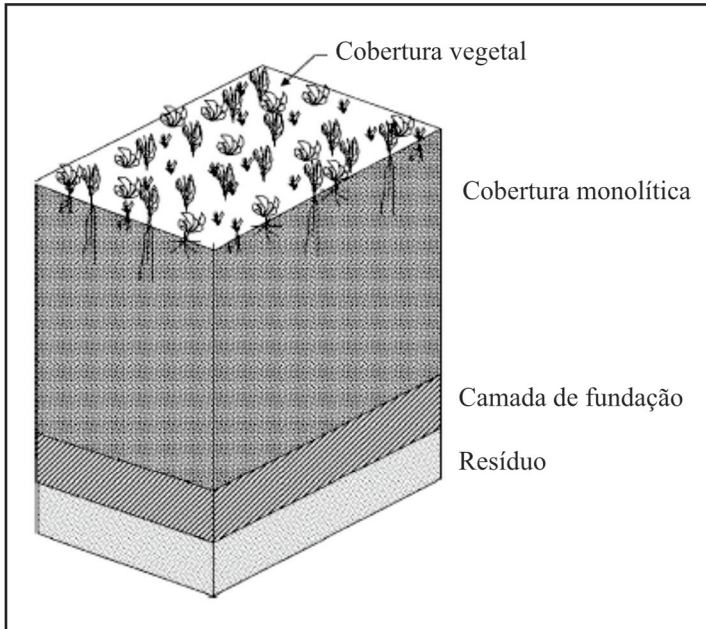


Figura 1 – Perfil de solo de uma barreira monolítica (adaptado de Zornberg & McCartney, 2007).

O aspecto principal da cobertura monolítica é a adequada determinação das propriedades hidráulicas dos solos, a saber, função da condutividade hidráulica não saturada e determinação da curva de retenção de água, assim como a determinação da espessura apropriada da camada de cobertura de solo.

O perfil de umidade em uma camada de solo monolítica prevê infiltração de água e aumento no valor da umidade durante eventos de precipitação e subsequente secagem durante eventos de evapotranspiração. Mesmo que o valor da umidade possa aumentar consideravelmente na base da camada monolítica, próximo da camada de resíduos sólidos, durante eventos de infiltração ou precipitação extremos, a maior ocorrência de variação de umidade deve ocorrer na região próxima do topo da camada monolítica.

Um parâmetro que deve ser utilizado para quantificar o armazenamento de umidade é a capacidade de campo, que é definida como o valor limite de umidade acima do qual o solo não mais retém água por capilaridade sob os efeitos da gravidade (Zornberg *et al.*, 1999). Quando água é adicionada ao solo que está no valor da capacidade de campo, ocorre drenagem. A capacidade de campo pode ser obtida por testes de infiltração, porém um valor geralmente aceito para siltes e argilas de baixa plasticidade é uma umidade correspondente a um valor de sucção de 33 kPa (Meyer & Gee, 1999). A capacidade de armaze-

namento de água de uma cobertura monolítica por unidade de área pode ser preliminarmente estimada multiplicando-se a umidade volumétrica na capacidade de campo (valores obtidos a partir da curva de retenção de água) pela espessura da cobertura.

1.2 Barreiras anisotrópicas

Barreiras anisotrópicas são similares a barreiras capilares, mas a concepção de projeto leva mais em conta a drenagem interna lateral através de uma ou mais camadas de drenagem, trabalhando em função da inclinação da cobertura (Stormont, 1995). Barreiras anisotrópicas envolvem tipicamente um substrato vegetativo superposto a uma camada de solo granular com função drenante, os quais são, por sua vez, superpostos a uma camada primária de solo fino e uma segunda camada de solo granular de forma a providenciar uma barreira capilar. A camada de solo granular atua tanto como uma barreira capilar para o substrato vegetativo como uma camada de drenagem para a água que atravesse a barreira capilar. A quantidade de água coletada pela camada de drenagem e a que permanece no substrato vegetal é substancialmente maior do que a que infiltra na barreira primária.

O efeito de barreira capilar da camada de solo granular, que também é uma camada de drenagem, aumenta a capacidade de armazenamento de água do substrato vegetativo, por manter a frente de umidade na camada superior do perfil. O projeto de uma barreira anisotrópica é mais complexo que de uma barreira monolítica ou de uma cobertura de barreira capilar devido à necessidade de quantificar as propriedades hidráulicas das camadas que compõem os perfis, bem como o volume de água que pode ser drenado lateralmente. Comparações de campo entre o desempenho de testes em escala de barreiras capilares, barreiras anisotrópicas e coberturas monolíticas realizadas por Dwyer (1998) indicaram que a barreira anisotrópica apresentou um bom desempenho quando comparada com outros sistemas de cobertura para as mesmas condições climáticas ao longo de um programa de cinco anos. Entretanto, é a que exige maior atenção técnica entre as três soluções no que se refere a seu projeto e construção.

1.3 Barreiras capilares

Barreiras capilares são coberturas evapotranspirativas que consistem em um sistema de solos em camadas que envolvem normalmente um solo fino (silte, argila) colocado sobre um material granular (areia, pedregulho, geotêxtil não tecido). Barreiras capilares usam o contraste nas propriedades hidráulicas entre o solo fino e o material granular para ampliar a capacidade da camada de solo fino em armazenar água. Um geotêxtil não tecido pode ser efetivo para agir como o material granular em contraste com o solo fino em um sistema de cobertura baseado em barreiras capilares.

Segundo McCartney *et al.* (2008), geotêxteis não tecidos são efetivos como barreiras hidráulicas em solos não saturados pela mesma razão que são efetivos para separação, proteção e drenagem: a média do tamanho de seus poros é maior que os da maioria dos solos. Quando instalado em solos finos, o geotêxtil pode agir como uma barreira ao fluxo de água devido ao fenômeno de ruptura capilar (*capillary break effect*). O fenômeno da ruptura capilar é um dos mecanismos que governam o fluxo de água em uma barreira

evapotranspirativa, cujo objetivo não é impedir que a água penetre no solo, como no caso das barreiras resistivas convencionais, mas que a água seja armazenada no solo para que seja, posteriormente, eliminada por evapotranspiração. Essas barreiras podem ser chamadas de barreiras capilares (*capillary barrier*), justamente por utilizarem o contraste entre dois geomateriais com tamanhos de poros diferentes para reter ou retardar o fluxo de água em sua interface.

O efeito de ruptura capilar é observado na interface entre solos finos com poros relativamente pequenos e materiais granulares que tenham poros relativamente grandes. O menisco na interface entre os poros pequenos e grandes deve superar a mudança relativa entre os raios dos poros menor e maior de forma a forçar o ar a sair do poro maior, que será preenchido por água. Em outras palavras, a energia da água no poro pequeno deve ser suficiente para permiti-la penetrar no poro maior. McCartney *et al.* (2008) afirmam ainda que o movimento da água do solo para o geotêxtil é afetado pelo tipo de polímero do geotêxtil. O polipropileno, um polímero comumente usado em geotêxteis não tecidos, é hidrofóbico e repele água (McCartney *et al.*, 2008 *apud* Henry & Patton, 1998).

Macroscopicamente, o efeito de ruptura capilar previne que uma quantidade de água flua do solo para dentro do geotêxtil não tecido até alcançar uma sucção crítica próxima a zero (saturação). Nesse ponto, a água é capaz de romper a resistência e migrar dos poros menores para os poros maiores. Essa sucção crítica, conhecida como sucção de passagem (*breakthrough suction*), geralmente ocorre quando a condutividade hidráulica dos dois materiais não saturados atinge o mesmo valor (Zornberg *et al.*, 2009).

A Figura 2 (Zornberg *et al.*, 2009) ilustra o fenômeno da ruptura capilar entre camadas de materiais com diferentes tamanhos de poros. Nesse caso, um solo fino com poros relativamente pequenos e um geotêxtil, que atua de forma similar a um solo granular, com poros relativamente grandes. O menisco ar-água na interface entre os materiais de poros maiores e menores deve vencer a mudança no raio dos poros, de r_1 para r_2 para forçar o ar a sair do poro maior.

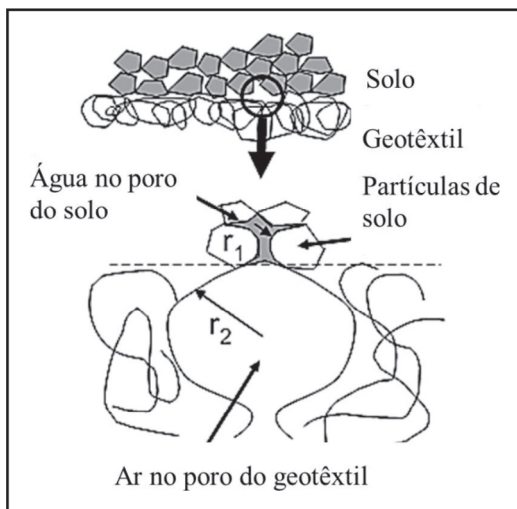


Figura 2 – Esquema ilustrando o efeito de ruptura capilar na interface solo-geotêxtil (adaptado de Zornberg *et al.*, 2009)

A dimensão menor dos poros do solo fino (r_1) resulta em valores de sucção comparativamente altos, e a água presente na camada de solo fino só migrará para os poros maiores (r_2) do geotêxtil quando atingir um valor de sucção significativamente menor, correspondente à sucção gerada nos poros do geotêxtil, relativamente maiores (r_2). Macroscopicamente, o efeito de ruptura capilar evita que uma quantidade considerável de água flua do solo fino para dentro do geotêxtil, até que o solo alcance um valor crítico de sucção, próximo de zero (saturação). Nesse ponto, a água é capaz de romper a interface dos materiais e fluir dos poros menores do solo para os poros maiores do geotêxtil (Zornberg *et al.*, 2009).

O fenômeno da ruptura capilar está diretamente relacionado com a compreensão da condutividade hidráulica em solos não saturados, e é o princípio de funcionamento das barreiras capilares. Segundo Zornberg *et al.* (2009), as barreiras capilares vêm se tornando uma tecnologia estabelecida para o controle do fluxo de água em solos não saturados. Uma barreira capilar se desenvolve quando um solo fino é superposto a uma camada de um material granular com poros relativamente maiores (como areias e pedregulhos), ou ainda a um geossintético poroso (como um geotêxtil não tecido). Heibaum (2010) define a camada de solo fino como camada capilar (*capillary layer*) e a camada de material granular de poros maiores como bloco capilar (*capillary block*). A camada do bloco capilar atua como uma barreira ao movimento descendente da água em condição não saturada.

O desempenho de uma barreira capilar é explicado em Williams *et al.* (2011) da seguinte forma: iniciando em condições relativamente secas, isto é, sob altas sucções, o solo de granulometria fina tem uma condutividade hidráulica significativamente menor que a do solo granular. Com o aumento da umidade e o decréscimo da sucção mátrica, a condutividade hidráulica da camada de solo fino irá aumentar gradativamente. A condutividade hidráulica da camada de solo granular irá permanecer comparativamente baixa até a sucção correspondente ao valor de entrada de água ser superada. Antes de alcançar essas condições, a água não irá se mover da camada de solo fino para a camada de solo granular, mesmo que a umidade na camada de solo fino continue aumentando. A entrada de água na camada de solo granular ocorrerá quando a sucção mátrica na interface se igualar ao valor de entrada de ar da camada de solo granular. Esse comportamento leva ao acúmulo de umidade e, conseqüentemente, ao acúmulo do volume de água na camada de solo fino.

Aos descrever sobre as aplicações hidráulicas das barreiras capilares em agricultura ou pisciculturas, Heibaum (2010) afirma que o aumento da demanda por soluções amigáveis aos recursos hídricos recomenda que se facilite o acesso das raízes de plantas à água e se diminua o consumo de água. Em muitos casos, quando da cobertura final de uma célula de um aterro sanitário ou mesmo quando toda a área do aterro alcança sua vida útil de operação, é recomendada a instalação de vegetação no solo, tanto rasteira quanto de árvores de médio porte. Dentre os papéis a serem desenvolvidos pela vegetação superficial em uma cobertura final de aterro, está a de paisagismo, a colaboração para o sistema evapotranspirativo, o favorecimento do ciclo hidrológico e reduzir os riscos de erosão no solo.

Sobre o papel das barreiras capilares na manutenção da vegetação superficial em áreas de disposição de resíduos em final de operação, Heibaum (2010) afirma que, para melhorar a retenção de água nas camadas superficiais de solos com grande permeabilidade e com vegetação, uma das soluções utilizadas é a instalação de uma camada de solo que

sirva como barreira abaixo da linha das raízes das plantas. Portanto, a instalação de uma barreira capilar funcionará como uma camada que age como uma barreira em tempos de precipitação pluvial normal, mas permite a infiltração de água em camadas mais profundas quando da ocorrência de chuvas mais frequentes. A instalação desse tipo de barreira, abaixo do solo cultivado, pode ser extremamente sofisticada, portanto deve ser avaliada criteriosamente a sua relação custo-benefício.

Segundo Zornberg *et al.* (2009), a chave para a compreensão das barreiras capilares é a avaliação do fluxo e armazenamento de água nos poros do geomaterial (pedregulhos, areia ou geotêxtil) sob condições não saturadas. Quando o grau de saturação do geomaterial diminui, sua condutividade hidráulica não permanece constante, ao contrário, cai significativamente com o decréscimo do grau de saturação. A condutividade hidráulica de um geomaterial não saturado, com poros relativamente grandes (como o material granular ou geotêxtil) diminui mais rapidamente do que em um solo fino. Tal fenômeno pode levar à situação em que a condutividade hidráulica de um cascalho não saturado ou um geotêxtil pode ser significativamente menor do que de um solo fino.

A compreensão da capacidade de armazenamento de água da camada de solo fino em uma barreira capilar é fundamental para sua utilização em projetos de engenharia. Morris e Stormont (1997, 1999), Park e Fleming (2006), dentre outros, destacam a aplicação das barreiras capilares nos projetos de cobertura final para aterros sanitários ou ainda como cobertura de pilhas de rejeitos de mineração. Para essas aplicações, é interessante reduzir a quantidade de umidade que chegará à camada de resíduo devido, por exemplo, à precipitação pluvial.

Segundo Morris e Stormont (1999), vantagens do uso de barreiras capilares em sistemas de cobertura incluem sua expectativa de longevidade, principalmente porque ela não estará suscetível à degradação comum a camadas compactadas de solo, e seu relativo baixo custo devido à sua configuração simples. Os mesmos autores sustentam ainda que o mais simples critério de projeto para uma barreira capilar é garantir que a camada superior possa armazenar a infiltração esperada devido às precipitações até que a umidade possa ser subsequentemente removida por evapotranspiração.

Uma variável fundamental em um projeto de barreira capilar é a espessura da camada de solo fino. A quantidade de evapotranspiração que pode ser esperada é usualmente fixada pelas condições climáticas do local. Um projeto mais complexo de barreira capilar inclui o uso de uma interface material fino-granular inclinada para promover o fluxo lateral da umidade na camada de material fino em condição não saturada. O uso de uma drenagem lateral não saturada para remover água do sistema provê um mecanismo para remoção de água, independente do clima local e de variações sazonais. O fluxo lateral em uma barreira capilar é principalmente uma função da condutividade hidráulica não saturada do material fino, assim como da inclinação da interface solo fino-solo granular.

O desvio lateral da frente de umidade em um meio não saturado é essencialmente função da gravidade e se relaciona com a inclinação da camada de solo fino na barreira capilar. Devido à umidade do solo fino tipicamente aumentar com a profundidade, o desvio lateral é concentrado na interface entre o solo fino e granular, em que a condutividade hidráulica é maior. Esse desvio da frente de umidade causará um aumento na umidade na direção da inclinação da camada de solo, que pode resultar em uma ruptura da barreira.

A distância inclinada em que a água pode percorrer antes de ocorrer a ruptura da barreira capilar (*breakthrough*) é chamada de comprimento de desvio, como mostrado na Figura 3 (Morris & Stormont 1997). Essa figura ilustra o funcionamento de uma barreira capilar em uma interface inclinada e a ocorrência de percolação de água após o solo fino se aproximar da saturação.

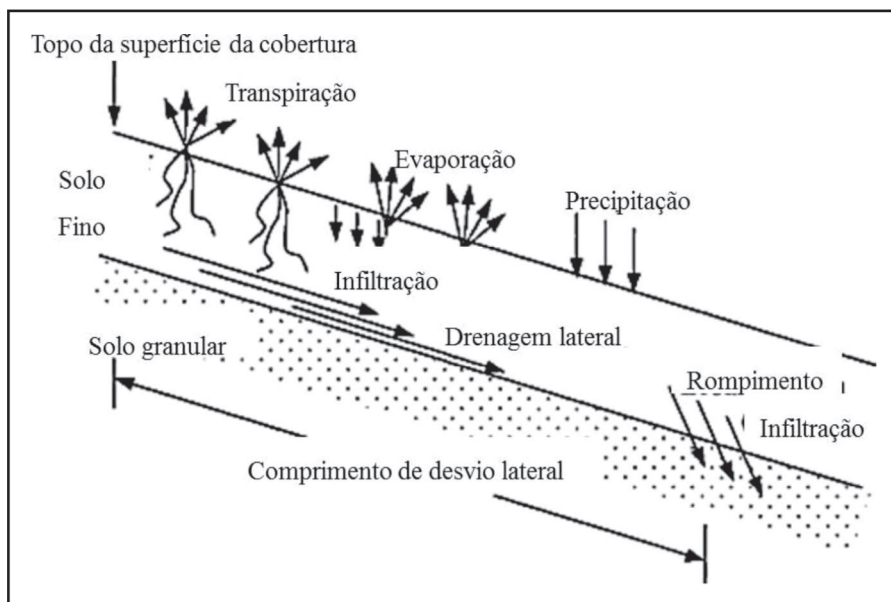


Figura 3 – Barreira capilar com camada drenante (modificado - Morris & Stormont, 1997).

Segundo Zornberg *et al.* (2010), a compreensão dos conceitos de fluxo de água em solos não saturados tem ganhado relevância em projetos de aterros sanitários devido ao aumento do número de coberturas alternativas que têm sido recentemente projetadas e construídas para depósito de resíduos contaminados ou instalações para rejeitos de mineração. O projeto de sistemas de cobertura envolvendo barreiras capilares tem se tornado uma tecnologia consolidada para o controle de fluxo em meios não saturados. Especificamente, barreiras capilares têm sido recentemente usadas em substituição a geomembranas impermeáveis em múltiplos projetos localizados em zonas áridas e semiáridas (como exemplos, os autores citam o noroeste dos Estados Unidos da América, o noroeste da Austrália e a África do Sul). Verifica-se que a presença de geossintéticos em sistemas de barreira capilar pode prover um desempenho superior ao das barreiras capilares compostas apenas por solos.

O projeto de sistemas de cobertura envolvendo barreiras capilares baseia-se fortemente na quantificação de processos atmosféricos e no fluxo de água através dos geomateriais (solos e geossintéticos). Na análise do desempenho de uma camada de solo de cobertura em aterro sanitário, é importante compreender ou definir o balanço hídrico, ou

seja, a quantidade de água que entra e sai da camada de solo em determinado período de tempo. Um dos dados essenciais ao projeto é o regime de chuvas da região e fatores que influenciam a evapotranspiração, tais como: incidência de radiação solar, regime de ventos e vegetação local.

A Figura 4 (Zornberg *et al.* 2009) ilustra os componentes do balanço hídrico. A Figura 4(a) mostra o balanço hídrico em uma cobertura resistiva, em que o controle da percolação basal é alcançado pela maximização do fluxo superficial. A Figura 4(b) ilustra os componentes do balanço hídrico em uma cobertura alternativa. Evaporação e armazenamento de água são componentes que influenciam significativamente o desempenho do sistema de cobertura evapotranspirativa. Drenagem lateral interna pode também ser um componente relevante em alguns tipos de cobertura (barreiras capilares em superfícies inclinadas).

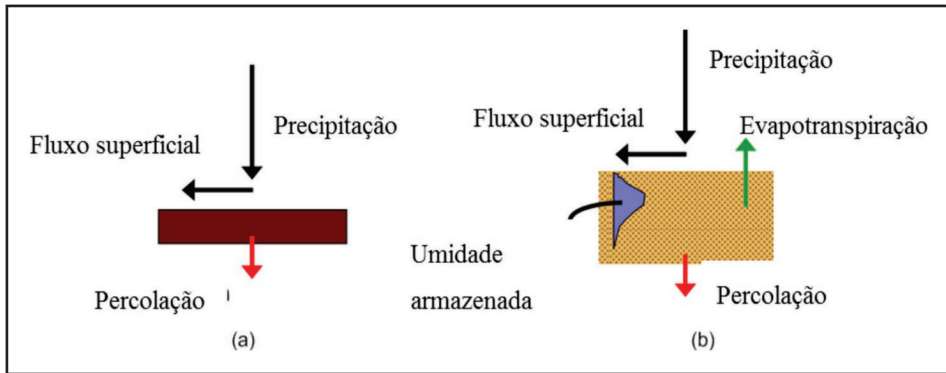


Figura 4 – Componentes do balanço hídrico em um sistema de cobertura (a) barreira resistiva (b) barreira evapotranspirativa (modificado - Zornberg *et al.*, 2009)

Vantagens adicionais de coberturas evapotranspirativas sobre sistemas de barreiras argilosas (de baixa permeabilidade) incluem um baixo potencial de fissuras por ressecamento, fácil construção e baixa manutenção. Ainda, coberturas evapotranspirativas podem ser construídas com uma razoável variedade de solos, contribuindo para redução de custos associados com o uso de solos locais em vez da necessidade de importar solos de outras regiões.

Segundo Zornberg e McCartney (2007), os componentes do balanço hídrico, considerados para quantificar a conservação da massa de água em uma cobertura projetada, podem incluir evaporação e transpiração de plantas (juntas são referidas como evapotranspiração), precipitação, fluxo superficial de água, armazenamento de umidade, drenagem lateral e percolação basal.

Objetivos adicionais de coberturas de aterro incluem acomodação de recalques diferenciais sem comprometer o desempenho da cobertura e controle do gás produzido pelos resíduos sólidos do aterro. Em adição, a cobertura deve permanecer estável em condições estáticas ou sísmicas, minimizando a manutenção em longo prazo, permitindo reuso do terreno, e provendo uma boa aparência estética (Zornberg & McCartney, 2007).

Segundo Zornberg *et al.* (2009), geralmente observa-se um desempenho superior de barreiras capilares com uso de geossintéticos em relação a barreiras capilares executadas apenas com solos. Dessa forma, os autores recomendam que um projeto adequado de coberturas com barreiras capilares deve sempre incorporar um geotêxtil não tecido na interface entre o solo fino e a camada inferior de solo granular da barreira capilar. McCartney *et al.* (2005) demonstraram que camadas de drenagem com geossintéticos em contatos com solos não saturados comportam-se de forma similar a camadas drenantes convencionais feitas de material granular, desenvolvendo uma ação de ruptura capilar que cria uma barreira ao fluxo de água, resultando no acúmulo de água acima da interface das camadas de solo.

Segundo Heibaum (2010), utilizar um geotêxtil como barreira para controle de umidade pode soar como contraditório quando se considera a porosidade e permeabilidade desse material. Entretanto, o conceito se baseia na concepção de um sistema de barreira capilar que foi originariamente concebido para dois tipos diferentes de solos, separados em diferentes camadas. Se a camada de geotêxtil for considerada como um bloco capilar, será necessário conhecer a curva de retenção de água do geotêxtil, em seu ramo de molhagem.

Devido ao grande volume dos poros de um geotêxtil, a curva de retenção de água se apresenta bem diferente da maioria dos solos. Em um geotêxtil, apenas uma sucção um pouco maior de 1 kPa, que é um nível bem baixo, é suficiente para reduzir o volume de água na camada significativamente. A curva de molhagem de um geotêxtil é singular, porque o geotêxtil tem sua capacidade de absorver água reduzida até que a sucção se aproxime de zero, talvez devido à característica hidrofóbica de suas fibras. Assim, segundo Heibaum (2010), existe potencial para que uma camada fina de geotêxtil possa ser satisfatoriamente usada em um sistema de barreira capilar, sendo usada para substituir camada de bloco capilar composta por material granular ou pedregulhos. Esta pode ser uma alternativa particularmente atrativa em regiões que não disponham de material granular, como pedregulhos, em grande quantidade, ou que estes se mostrem como um recurso de preço elevado.

2. COMPORTAMENTO NÃO SATURADO DE UMA BARREIRA CAPILAR

Um sistema de barreira capilar é, por definição, um sistema que trabalha dentro de um regime de não saturação. Para o devido entendimento do comportamento hidráulico do sistema, é necessária a compreensão de como a condutividade hidráulica do material se comporta à medida que se altera a umidade do meio. Também é importante determinar a relação entre quantidade de água presente no sistema e a variação de seus níveis de sucção.

A Figura 5 ilustra alguma das mais comuns relações entre fases do solo, usadas para analisar o processo de fluxo de ar e água em um solo não saturado. A umidade volumétrica θ é definida pela razão entre o volume de água e o volume total do meio considerado. A porosidade n é a razão entre o volume de vazios e o volume total considerado e corresponde à umidade volumétrica na saturação ($n = v_s$). O grau de saturação S é a razão entre a umidade volumétrica e a porosidade. Finalmente, a quantidade volumétrica de ar presente é a diferença entre a porosidade e a umidade volumétrica (Zornberg & McCartney, 2007).

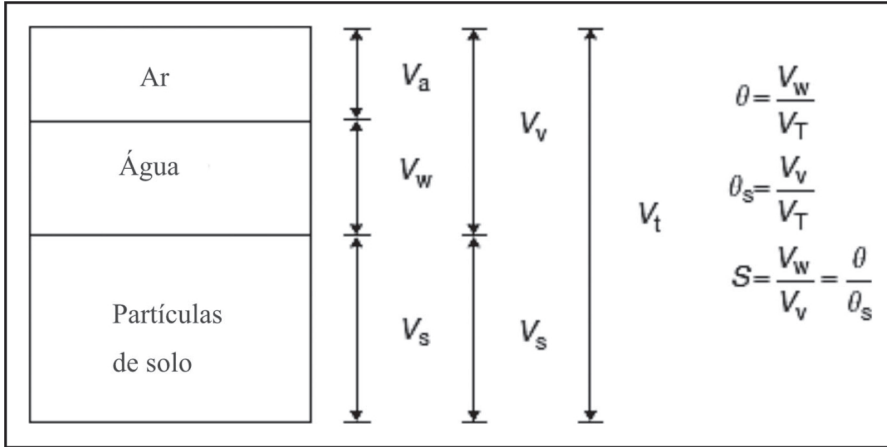


Figura 5 – Diagrama volumétrico de fases para solo não saturado (modificado de Zornberg & McCartney, 2007)

Em um solo não saturado, água é contida dentro dos poros contra a força da gravidade por uma combinação de pressões por adsorção e capilares (Olson & Langfelder, 1965 *apud* Zornberg & McCartney, 2007). Pressões por adsorção estão presentes no solo devido a campos elétricos e forças atrativas de curto alcance (forças de van der Waal), principalmente em argilas plásticas, em que a rede de cargas negativas dos dipolos da água e a superfície das partículas de argila interagem com os cátions na água dos poros do solo. A pressão capilar é quantificada como a diferença entre a pressão de ar e a pressão de água nos poros do solo. A água é o fluido de molhagem para a maioria das partículas de solo, e o menisco ar-água desenvolvido entre partículas individuais de solo são membranas tensionadas convexas. Consequentemente, a pressão de ar é maior que a pressão de água, que tem uma magnitude negativa (Zornberg & McCartney, 2007).

Pressões de adsorção e capilares são tipicamente consideradas juntas como uma simples variável, denominada sucção mátrica, ψ , que tem unidade de pressão (kPa). A sucção mátrica pode ser expressa pela Equação 1 (Zornberg & McCartney 2007). Nessa equação, para fins de simplificação, consideram-se os poros conectados e cilíndricos:

$$\psi = P_a - P_w = h_c \cdot \rho_w \cdot g = \frac{2 \cdot \sigma_{aw} \cdot \cos \gamma}{R} \tag{Eq. 1}$$

Onde:

P_a = pressão de ar nos poros;

P_w = pressão de água nos poros;

h_c = altura da ascensão capilar em uma pipeta de raio R ;

ρ_w = densidade da água;

g = aceleração da gravidade;

σ_{aw} = tensão superficial entre água e ar;

γ = o ângulo de contato de molhagem.

Assumindo-se, na Equação 1, que o ar está sob pressão atmosférica ($P_a = 0$), tem-se que a sucção é inversamente proporcional ao raio dos poros. Consequentemente, para a mesma umidade volumétrica, um solo fino (com raio dos poros comparativamente menores) terá uma sucção mais elevada que um solo granular.

O armazenamento de água no solo é tipicamente quantificado utilizando-se a relação entre umidade volumétrica e sucção, conhecido como Curva de Retenção de Água do Solo. A forma que a curva de retenção de água assume depende da estrutura do material geotécnico na qual é medida. Materiais granulares ou de poros mais abertos (areia e geotêxtil) mostram uma resposta altamente não linear, com um significativo decréscimo de umidade (ou grau de saturação) em uma faixa estreita de variação de sucção. Materiais finos (silte e argila) mostram uma redução mais gradual na umidade com o aumento da sucção. A não linearidade observada nessas relações é, em parte, causada pela faixa de distribuição de poros desses materiais.

A curva de retenção de água de determinado material não é sensível apenas à distribuição de poros, mas ainda, no caso de solos, à mineralogia, densidade e estrutura dos poros (Hillel, 1988 *apud* Zornberg & McCartney, 2007). A curva de retenção de água pode ser diferente quando o material está em processo de molhagem ou quando está em processo de secagem, sendo tal fenômeno conhecido como histerese. Durante a secagem, os poros maiores drenam primeiro, seguido dos poros menores. Durante a molhagem, os poros menores enchem primeiro, mas a presença de poros maiores pode impedir alguns de serem preenchidos por água. Ainda, molhagem de um meio inicialmente seco, muitas vezes, resulta em um encapsulamento de água dentro dos poros maiores, o que retarda a saturação do meio, a não ser que seja aplicada uma pressão positiva na água.

Uma importante característica na curva de retenção de água é o valor de entrada de ar. Durante a secagem inicial de uma amostra de solo totalmente saturada, a água não flui do solo até que a sucção correspondente ao valor de entrada de ar seja alcançada. Quando essa sucção é alcançada, a umidade cai da saturação para um valor que permanece aproximadamente constante com o aumento da sucção. Essa condição residual ocorre porque a água se torna descontínua dentro dos poros do solo, sem caminhos disponíveis para ocorrer fluxo de água (Zornberg & McCartney, 2007). A partir desse ponto, o fluxo se dá, principalmente, em termos de vapor.

Muitas técnicas estão disponíveis para determinar a curva de retenção de água de um geomaterial de forma experimental. Segundo Zornberg e McCartney (2007), dois principais grupos de técnicas podem ser usadas para determinar a curva de retenção de água. O primeiro grupo de técnicas físicas envolve um material inicialmente saturado do qual a água é lentamente expelida por imposição de uma sucção na sua superfície. A técnica física mais comumente usada é a de translação de eixos. Um teste conhecido que utiliza essa técnica é o teste de coluna suspensa (*hanging column test*), ilustrado na Figura 6.

O teste envolve um disco cerâmico que é conectado a um manômetro de tubo. O conjunto disco cerâmico e manômetro de tubo são mantidos saturados, e uma amostra de solo ou outro geomaterial poroso é colocada, também inicialmente saturada, sobre o disco cerâmico. Uma pressão negativa é imposta ao disco cerâmico mantendo o nível de água no manômetro de tubo abaixo do disco cerâmico. Devido à imposição de uma pres-

são de água negativa, a amostra inicialmente saturada vai sofrer variação em sua umidade volumétrica, sendo possível traçar a sua curva de retenção de água.

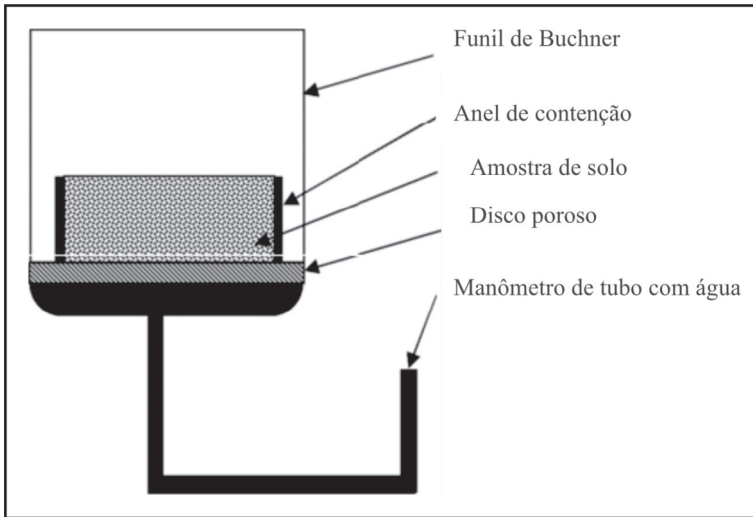


Figura 6 – Ensaio de coluna suspensa – teste convencional usado para amostras de solo (modificado de Zornberg *et al.*, 2009).

Outra técnica física citada por Zornberg *et al.* (2009) é o ensaio de placa de pressão. A Figura 7 ilustra o conjunto típico usado para realização do ensaio. Uma amostra de solo é colocada sobre uma placa de cerâmica que conduz apenas água, e é aplicada uma pressão de ar sobre a amostra de solo. A pressão de ar aplicada força a água dos poros da amostra através do disco cerâmico. No equilíbrio, a pressão de ar corresponde à pressão de capilaridade desde que a pressão de água seja mantida igual a zero.

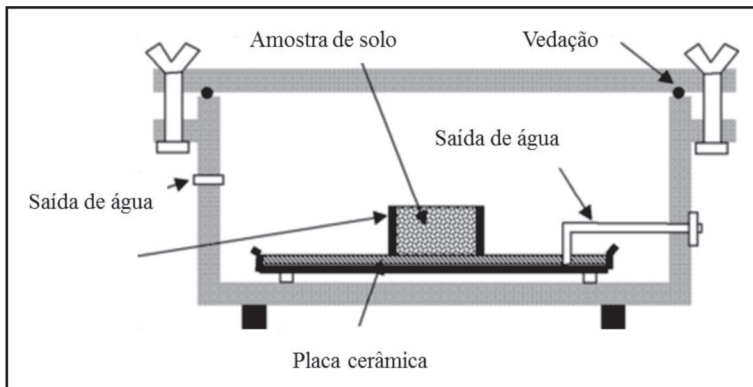


Figura 7 – Ensaio de disco de pressão – modo convencional para ensaio de amostras de solo (modificado de Zornberg *et al.*, 2009)

O volume de água que sai da amostra e atravessa o disco cerâmico é medido usando-se um frasco de Mariotte de carga constante. Esse procedimento é repetido sucessivamente com pressões cada vez maiores que gradativamente levam à secagem da amostra de solo.

A pressão pode ser subsequentemente reduzida para se medir o comportamento da amostra na molhagem. Ao final do teste, a umidade gravimétrica da amostra de solo é medida de forma destrutiva, e a umidade em cada incremento de pressão pode ser retrocalculada a partir das medidas de volumes de água expelidos da amostra e coletados no frasco de Mariotte.

Um segundo grupo de técnicas (técnicas termodinâmicas) envolve ensaios que permitem a evaporação de água da amostra dentro de uma câmara fechada, em condições controladas de umidade. A umidade relativa é controlada pela evaporação de água de uma solução salina saturada colocada dentro da câmara.

A Figura 8 ilustra uma técnica termodinâmica convencional para determinar a curva característica em amostra de solo.

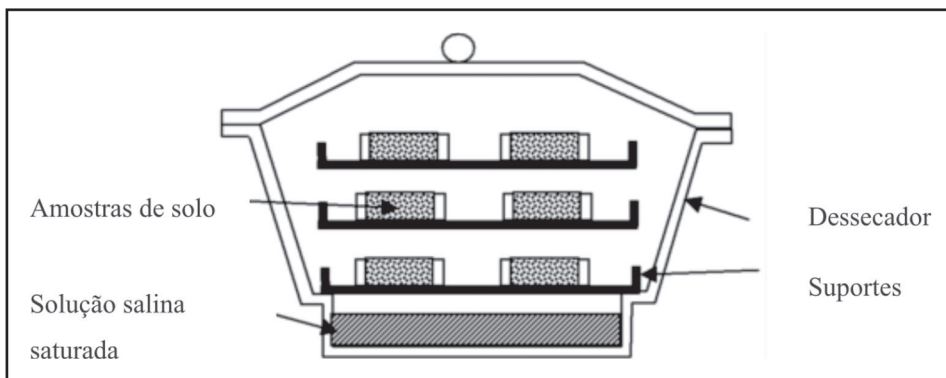


Figura 8 – Técnica termodinâmica para determinar curva de retenção de água em solos (modificado de Zornberg *et al.*, 2009).

Geralmente técnicas físicas são utilizadas para níveis relativamente baixos de sucção (abaixo de 1500 kPa), enquanto técnicas termodinâmicas são usadas para sucções mais altas.

Técnicas convencionais para determinar a curva de retenção de água de geomateriais frequentemente requerem significante parcela de tempo para obter uma quantidade limitada de dados. Por exemplo, a determinação da curva de retenção de água para uma argila de alta plasticidade pode consumir vários meses. Ainda, testes convencionais requerem o uso de muitas amostras e procedimentos destrutivos para a determinação da umidade. Problemas específicos para a determinação da curva característica envolve difusão de ar através da pedra porosa (ou disco cerâmico), falta de controle de mudança de volume durante procedimento de molhagem e secagem e inaptidão para impor um estado de tensão representativo das condições de campo (Zornberg *et al.*, 2009).

De posse dos dados experimentais, a curva de retenção de água de um material pode ainda ser normalizada por ajuste dos dados experimentais. Um dos modelos mais comu-

mente usados para isso é o proposto por van Genuchten (1980), utilizado em análises numéricas porque é diferenciável para o intervalo completo de sucções. A proposta do modelo de van Genuchten (1980) para ajuste da curva de retenção de água, a partir de dados experimentais, pode ser expressa pela Equação 2:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \times [1 + \alpha \psi^N]^{-(1-1/N)} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

- θ_r = é a umidade volumétrica residual;
- θ_s = é a umidade volumétrica saturada (porosidade);
- α = (unidade em kPa^{-1}); e
- N = (adimensional) são parâmetros de forma.

A relação entre condutividade hidráulica e sucção, também referida como função de condutividade hidráulica (Função K), prevê a medida do aumento da impedância contra o fluxo de água com a redução da umidade do meio.

Próximo da saturação, os materiais granulares (areia e geotêxtil) têm alta condutividade hidráulica, enquanto materiais finos (siltes e argilas) têm baixa condutividade hidráulica. Entretanto, à medida que o meio perde umidade, os materiais granulares terminam tendo menor condutividade hidráulica que os materiais finos.

O desempenho superior de coberturas evapotranspirativas em climas áridos em relação a coberturas resistivas convencionais pode ser atribuído à menor condutividade hidráulica não saturada dos materiais selecionados para a cobertura (Zornberg & McCartney, 2007).

Métodos convencionais para a determinação da Função K demandam tempo e investimentos, e são sujeitos a erros experimentais. De forma geral, a Função K é prevista por modelos matemáticos baseados na curva de distribuição de poros ou na curva de retenção de água, como o proposto por van Genuchten-Mualem (1980) *apud* Zornberg *et al.* (2009), e apresentado na Equação 3:

$$K(\theta) = K_{\text{sat}} \cdot \sqrt{\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}} \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1-N} \right)^{\frac{1}{(1-N)}} \right]^2 \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

- θ_r = é a umidade volumétrica residual;
- θ_s = é a umidade volumétrica saturada (porosidade);
- K_{sat} = é a condutividade hidráulica saturada; e
- N = um fator adimensional.

Segundo Zornberg *et al.* (2009), apesar das dificuldades para realização dos ensaios de laboratório para obtenção da condutividade hidráulica do solo, algumas técnicas têm sido propostas para a determinação direta da função da condutividade hidráulica não saturada. As técnicas que têm sido usadas para medir a função da condutividade hidráulica

de amostras de solo tipicamente envolvem fluxo de água através de amostras confinadas em permeâmetros.

Ensaio com permeâmetros permitem diferentes formas de confinamento da amostra de solo, formato da amostra, controle das condições de contorno e instrumentação. A função da condutividade hidráulica não saturada pode ser estimada usando-se processo de fluxo constante ou transiente.

McCartney *et al.* (2007), em uma análise de fluxo transiente, utilizaram um permeâmetro de coluna de PVC com diâmetro interno de 203 mm. O esquema utilizado no ensaio está ilustrado na Figura 9. O diâmetro da coluna permitia reduzir a fuga da água ao longo das paredes internas do permeâmetro e prover uma boa área de infiltração para o fluxo de água. Um perfil de solo com espessura de 750 mm foi utilizado para minimizar efeitos de borda na umidade registrada durante a infiltração.

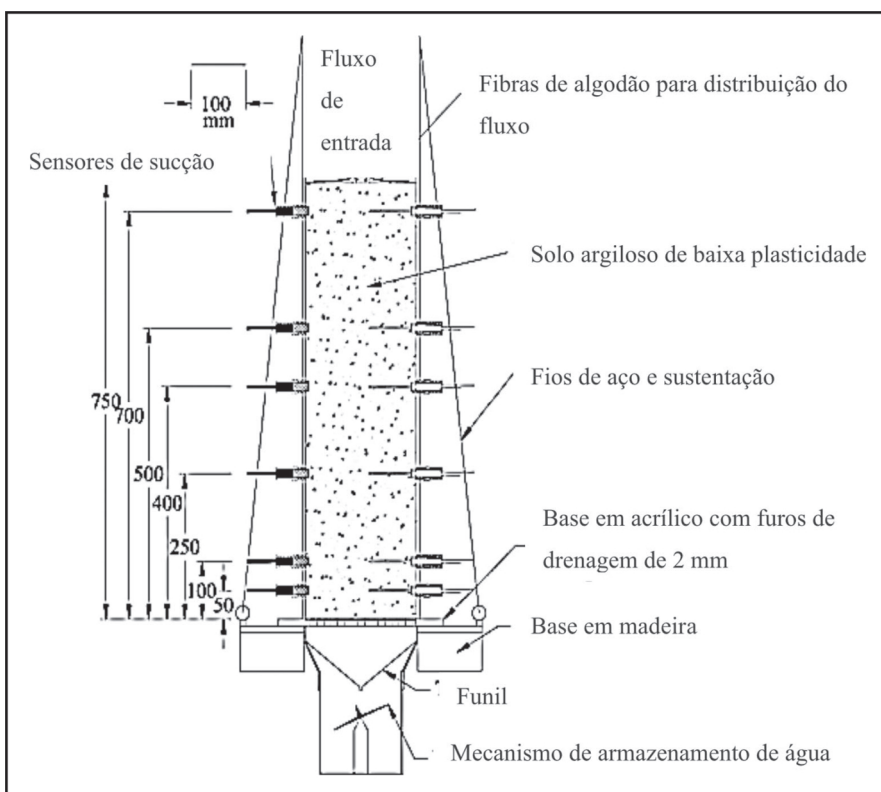


Figura 9 – Permeâmetro de coluna instrumentado para determinação da condutividade hidráulica não saturada (modificado de McCartney *et al.*, 2007)

Devido à altura do arranjo, foi necessário instalar vários componentes responsáveis por manterem a vedação hidráulica e a devida estabilidade do sistema durante a execução da coluna de solo. A coluna de PVC foi anexada ao quadro de sustentação utilizando-

-se fios de aço tensionados. Os fios foram fixados com parafusos no suporte de madeira, e ganchos metálicos foram fixados à borda superior da coluna de alumínio. Os fios foram mantidos tensionados para dar a devida estabilidade ao sistema. A base da coluna foi instalada sobre uma placa de acrílico que tinha sua parte central perfurada com furos de 2 mm. A placa de acrílico teve a função de servir como uma face de livre drenagem para a coluna de solo. A coluna de PVC foi selada junto à placa de acrílico usando-se anéis de borracha colocados dentro de ranhuras na base da coluna, para a devida selagem hidráulica. O fluxo de saída foi medido por um balde com pluviômetro com registro de gotejamento (*tipping-bucket*) (McCartney *et al.*, 2007).

Durante o ensaio, foi induzido fluxo na parte superior da coluna de solo. Foram instalados reflectômetros (*TDR*) ao longo da coluna do permeâmetro para medir o avanço da umidade na amostra em função do tempo, medindo-se o teor de umidade e estimando-se o volume de água no solo com o tempo. A partir dos dados de fluxo e da variação da umidade registrada pelos *TDR*, os autores calcularam a função da condutividade hidráulica do material ensaiado.

McCartney *et al.* (2007) utilizaram, para análise dos dados de infiltração, a proposta de Função K para fluxo transiente com registro instantâneo de dados, com a discretização da Lei de Darcy, de acordo com a Equação 4:

$$K_i = \frac{\Delta V_{wi}}{A \cdot \Delta t} \left(\frac{-1}{\left(\frac{dh}{dz} \right)_i} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

onde z é a altura a partir da base da amostra de solo ensaiada, ΔV_{wi} é o volume de água que passa pelo ponto i no perfil de solo durante um intervalo de tempo Δt , “ A ” é a área seccional da amostra de solo, e h é a carga hidráulica expressa na Equação 5:

$$h = z + \frac{u_w}{\gamma_w} \quad (\text{Eq. 5})$$

onde γ_w é o específico da água e, u_w é a poropressão e z a cota do ponto considerado. Assumindo-se que a pressão de ar no solo não saturado é zero e substituindo-se a sucção ($u_a - u_w$) na Equação 5, tem-se a carga hidráulica total expressa pela Equação 6:

$$h = z - \frac{\Psi}{\gamma_w} \quad (\text{Eq. 6})$$

onde ψ é sucção mátrica. O gradiente hidráulico utilizado na Equação 7 pode ser calculado para cada ponto, como expresso na Equação 7:

$$i_i = -1 - \frac{1}{\gamma_w} \left(\frac{\Psi_i - \Psi_{i-1}}{z_{i-1} - z_i} \right) \quad (\text{Eq. 7})$$

onde $i = 0$ na face superficial da amostra de solo, sob um valor de infiltração constante. Para infiltração descendente vertical, o valor de i aumenta com a profundidade.

Durante um dado intervalo de tempo Δt e intervalo de profundidade z_i , o volume de água infiltrado em um dado ponto pode ser obtido integrando o perfil de umidade, como na Equação 8:

$$\Delta V_{w,i}^j = A \sum_{i=1}^n (\theta^j - \theta^{j-1})(z_{i-1} - z_i) \quad (\text{Eq. 8})$$

onde j representa o corrente intervalo de tempo, e n é o número total de pontos a serem calculados.

De Lima (2014) realizou uma série de ensaios de infiltração em colunas de pequeno porte, simulando o comportamento de alguns diferentes arranjos de barreiras capilares com e sem a presença de geossintéticos. A Figura 10 ilustra uma das colunas executadas com a presença de solo de cobertura e geotêxtil não tecido.

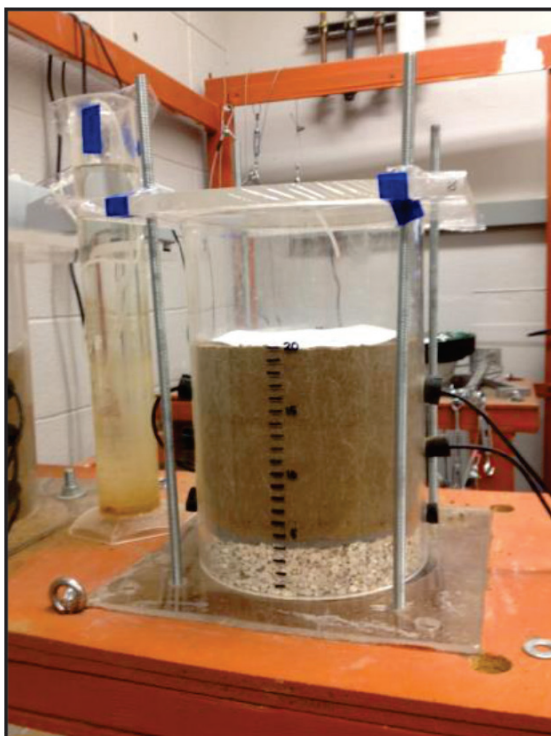


Figura 10 – Coluna para simulação de perfil de cobertura utilizando solo RMA Tipo II com presença de geotêxtil não tecido como camada de bloco capilar (De Lima, 2014)

O contraste entre os poros do solo e do geotêxtil é responsável pelo efeito de quebra capilar, fazendo o sistema se comportar como uma barreira capilar ao fluxo descendente de água. Em seus ensaios, De Lima (2014) utilizou o solo RMA Tipo II, classificado co-

mo uma argila de baixa plasticidade (CL pela Classificação Unificada de Solos). Esse solo foi retirado em 2001 da cobertura de um aterro sobre depósito de rejeitos químicos, localizado dentro da reserva natural *Rocky Mountain Arsenal* (RMA), próxima de Denver, Colorado, EUA. A área faz parte de uma reserva ecológica, mas, no passado, sediou uma indústria química que lançou grande parte de rejeitos no solo, sendo, posteriormente, objeto de recuperação ambiental por parte do governo norte-americano.

Para a realização dos ensaios, foram utilizados cilindros em acrílico, com diâmetro interno de 197 mm, e, dentro desses cilindros, foram compactados perfis de solos combinados que simulavam coberturas finais de depósitos de resíduos sólidos.

A densidade específica dos grãos (G_s) do solo RMA Tipo II foi determinada como 2,71, usando-se o procedimento descrito na norma americana ASTM D854-92. Os limites de liquidez (w_L) e de plasticidade (w_p) foram determinados de acordo com a norma ASTM D4318. O solo tem um limite de liquidez de 28,74% e um índice de plasticidade (IP) de 17,18%.

O objetivo principal deste estudo foi observar a influência de geossintéticos na formação do efeito de barreira capilar em perfis de solo utilizados em coberturas de aterros. Para a montagem das colunas de infiltração, foram utilizados geotêxteis não tecidos, com diferentes massas por unidade de área. A Tabela 1 apresenta as principais características dos geotêxteis utilizados.

Tabela 1 - Características físicas dos geotêxteis não tecidos utilizados.

Nomenclatura	Gramatura (g/m ²)	d_f (mm)	K_{sat} (m/s)
G1	200	0,027	0,4
G2	300	0,027	0,4
G3	400	0,027	0,4

Os geotêxteis não tecidos já estavam disponíveis no laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília e foram utilizados em estudos anteriores por Gardoni (2000) e Tatto (2010). Os geotêxteis receberam a nomenclatura G1, G2 e G3 de acordo com a massa por unidade de área. Os valores de d_f (diâmetro da fibra de poliéster) e K_{sat} (condutividade hidráulica saturada) foram retirados de Gardoni (2010) e Gardoni (1995), respectivamente.

Para o monitoramento do desempenho, as colunas foram instrumentadas com sensores de umidade e de sucção. Como sensores de umidade, foram utilizados o modelo ECH2O EC-5, da *Decagon Devices*. O sensor EC-5 é um sensor de baixo custo que calcula a umidade volumétrica do meio a partir de equações de calibração próprias. As dimensões do sensor de umidade ECH2O EC-5, informadas pelo fabricante, são de 8,9cm de comprimento, 1,8 cm de largura e 0,7 cm de espessura e utiliza a tecnologia *WCR* (*Water Content Reflectometers*).

A Figura 11 apresenta resultados obtidos por De Lima (2014) para ensaios de infiltração em coluna realizados com diferentes configurações. O resultado denominado “Solo RMA” equivale a uma configuração de cobertura na qual foi utilizada uma camada de solo RMA superposta a uma camada de pedregulhos. Os demais resultados foram obtidos

com a utilização de geossintéticos com diferentes gramaturas, sendo utilizados como camada de contraste com o solo RMA, de poros menores.

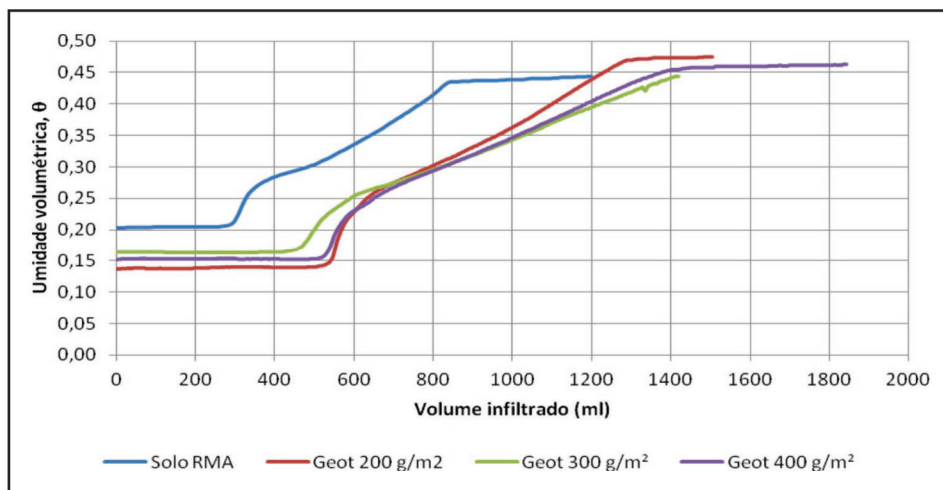


Figura 11 – Variação da umidade volumétrica medida em ensaio de infiltração em coluna (De Lima, 2014)

Com a presença da camada de geotêxtil não tecido, os valores finais de umidade na base do perfil são maiores, em torno de 0,47, e a camada de solo suporta um valor maior de volume de água antes que a frente de molhagem saia por sua base (*breakthrough*). Quando utilizado geotêxtil não tecido com gramatura de 200 g/m², o sistema acumula 1280 ml antes de romper a barreira capilar, enquanto os geotêxteis de 300 g/m² e 400 g/m² permitiram acumular 1400 ml. Os dados mostram um ganho acima de 50% na capacidade de retenção de água pela camada de solo quando se utilizou geotêxtil.

A presença do geotêxtil não tecido reforça o efeito de barreira capilar e aumenta o tempo para ocorrência do *breakthrough*, melhorando a capacidade de retenção da camada de solo. Esse efeito é útil em um sistema de cobertura evapotranspirativa, na qual se deve acumular água na camada de cobertura para posterior eliminação.

Em seus estudos sobre barreiras capilares, De Lima (2014) também analisou o comportamento não saturado dos geotêxteis não tecidos utilizados em sua pesquisa, determinando a curva de retenção e água desses materiais. Foram realizados ensaios de coluna suspensa (*hanging column test*) para determinação da curva de retenção de água dos geotêxteis utilizados. A curva de retenção de água, por vezes também chamada de curva característica, relaciona a umidade volumétrica ou o grau de saturação do material com a sucção em seus poros.

Stormont *et al.* (1997) propuseram uma metodologia para medição da curva característica de geossintéticos, metodologia esta adaptada dos ensaios de coluna suspensa para solos granulares. Outros autores, como Bouazza *et al.* (2006), utilizaram metodologias semelhantes para a caracterização hidráulica de geossintéticos e geocompostos.

Foi utilizado um equipamento desenvolvido no laboratório de Geotecnia da Universidade do Texas, em Austin, pelo grupo do Professor Jorge Gabriel Zornberg e utilizado em pesquisas como a desenvolvida por Azevedo (2012), para a determinação da curva de retenção de água em geossintéticos. Para este trabalho, foram medidas as curvas de retenção de água dos três geotêxteis não tecidos utilizados nos ensaios de infiltração em coluna, com massas por unidade de área de 200 g/m²; 300 g/m² e 400 g/m².

A Figura 12 apresenta os resultados obtidos para a curva de retenção de água dos diferentes geotêxteis não tecidos ensaiados. As trajetórias de secagem para os três geotêxteis ensaiados mostram que os valores iniciais das curvas de secagem, bem como os valores da parte final das trajetórias de secagem, próximo dos valores de umidade volumétrica residual, apresentam comportamento semelhante. A drenagem inicial dos três geotêxteis apresenta uma movimentação gradual da água saindo da amostra, com o aumento do valor da sucção.

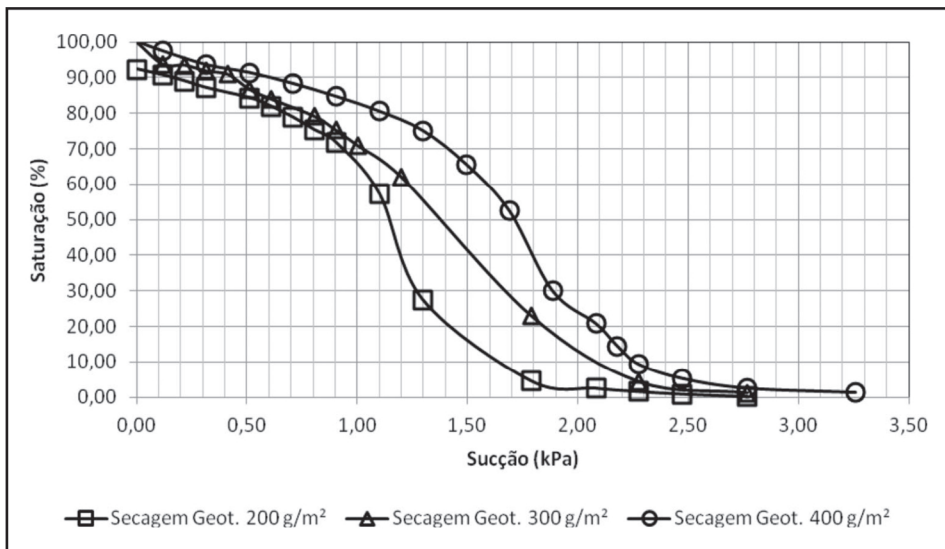


Figura 12 – Comparativo entre curvas de retenção de água de geotêxteis ensaiados com diferentes gramaturas, considerando o ramo de secagem e a saturação das amostras.

Analisando-se a parte final da trajetória de secagem, observa-se que o geotêxtil com massa por unidade de área igual a 400 g/m² alcançou a umidade volumétrica residual para um valor de sucção maior que os demais. Isso significa que é necessário aplicar uma sucção maior para retirar a água dos poros do geotêxtil, possivelmente por esse geotêxtil possuírem menores restrições em seus canais de fluxo.

Considerando-se a parte central das trajetórias de secagem compreendida entre o valor de entrada de ar (Ψ_{aev}) e o valor de umidade volumétrica residual, observa-se que, à medida que o geotêxtil apresenta maiores massas por unidade de área, tem-se uma maior umidade volumétrica para o mesmo valor de sucção, indicando que o material tem maior

capacidade de retenção de água. Esse comportamento é compatível com os resultados obtidos nos ensaios de infiltração em coluna, em que o geotêxtil de 400 g/m² permitiu um maior armazenamento de água na camada de solo compactado sobrejacente.

3. MONITORAMENTO DE DESEMPENHO EM COBERTURAS EVAPOTRANSPIRATIVAS

Nas últimas décadas, tem ocorrido um significativo esforço para se expandir o conhecimento e o uso de coberturas evapotranspirativas, principalmente pela execução de testes em campo em escala real envolvendo o monitoramento da percolação basal e dos perfis de umidade (Dwyer, 1998; Zornberg & McCartney, 2003). Sistemas de monitoramento permitem a quantificação direta da resposta da cobertura evapotranspirativa às condições atmosféricas do local de implantação do sistema. Programas de monitoramento de campo devem ser consistentes com os critérios de desempenho usados no projeto de cobertura. Diferentes tecnologias têm sido consideradas para avaliar a percolação basal, perfis de umidade, perfis de sucção e variáveis meteorológicas, como discutidas a seguir.

3.1 Utilização de lisímetros volumétricos

Lisímetros volumétricos são os instrumentos mais comumente utilizados para monitoramento direto da percolação basal. Tipicamente, consistem em uma camada de drenagem superposta a uma barreira hidráulica, como um geocomposto ou uma camada de material granular colocada sobre uma geomembrana. Geocompostos utilizados como lisímetros consistem em uma georede comprimida entre duas camadas de geotêxteis não tecidos. Uma georede é uma geossintético com geometria espacial que permitem alta transmissibilidade lateral. Geotêxteis são tecidos poliméricos usados como filtros, camadas de proteção ou camadas drenantes. Geomembranas são mantas poliméricas que têm baixíssimos valores de condutividade hidráulica (da ordem de 10⁻¹⁵ m/s). Quando uma cobertura de solo é instalada acima do lisímetro, pretende-se que a percolação através da camada de solo alcance o geocomposto e seja conduzida de forma descendente até um recipiente coletor. Para desempenho efetivo, é importante evitar que a presença do lisímetro interfira no fluxo de água no sistema de cobertura.

A principal vantagem no uso de lisímetros é que eles podem ser construídos para monitorar grandes áreas, o que permite uma melhor compensação da medição do fluxo na área monitorada, considerando-se eventuais ocorrências de caminhos preferenciais de fluxo (áreas de baixa compactação, fissuras no solo, tocas de animais ou raízes de plantas). Entretanto, lisímetros têm algumas deficiências, a mais significativa sendo que eles provêm pouca informação interna das razões sobre o funcionamento adequado ou não do sistema de cobertura. Outra limitação é que, apesar de sua alta transmissibilidade e permissividade quando saturada, o componente geotêxtil presente no lisímetro pode causar uma quebra capilar, resultando em uma barreira capilar quando o solo está não saturado (Stormont & Morris, 2000; Zornberg & McCartney, 2003). A ocorrência de uma quebra capilar na interface solo-lisímetro distorceria a sucção e o perfil de umidade em uma cobertura evapotranspirativa e poderia resultar em uma significativa subestimativa da percolação basal.

3.2 Monitoramento de umidade e perfil de sucção com uso de sensores

O desempenho de uma cobertura evapotranspirativa pode ser avaliado por sua capacidade de armazenar umidade até que seja removida por evapotranspiração. Dessa forma, é importante que a umidade volumétrica e a sucção sejam monitoradas ao longo do perfil para certificar se o sistema de cobertura está ou não funcionando de forma adequada. Monitoramento contínuo *in situ* do valor da umidade volumétrica ao longo do perfil é importante em muitos projetos de hidrologia ou engenharia ambiental. Particularmente, monitoramento da umidade volumétrica do solo pode prover importantes informações sobre o movimento da umidade através das camadas da cobertura evapotranspirativa.

Tecnologias como o *TDR* (*Time Domain Reflectometry*) têm sido utilizadas para medir a umidade volumétrica em sistemas de cobertura evapotranspirativa (Zornberg & McCartney, 2003). O *TDR* envolve a medição da velocidade de um pulso eletromagnético aplicado. O pulso é refletido devido a mudanças na impedância ao longo da transmissão do sinal pelo sensor. A velocidade do pulso refletido é afetada pela constante dielétrica da água presente na massa de solo, que é uma ordem de grandeza maior que a do ar e das partículas de solo. A constante dielétrica da massa de solo, calculada a partir da velocidade do pulso refletido, pode ser, então, relacionada com a umidade volumétrica do solo onde o sensor está instalado.

A Figura 14 apresenta um modelo de sensor *TDR* (Figura 13a) e uma ilustração do sistema de registro e coleta de dados (Figura 13b), utilizado por Azevedo (2012). O sensor de umidade volumétrica modelo *TDR* é fabricado pela *Soil Moisture Equipment Corp.* O sistema de aquisição de dados é o *TDR100*, fabricado pela *Campbell Scientific*, utilizado para coleta e armazenamento de informações sobre a variação de umidade volumétrica do solo.

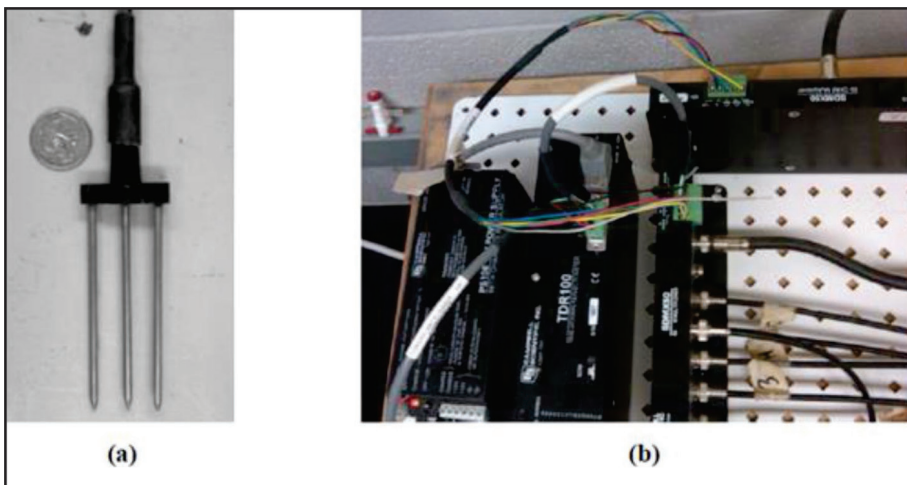


Figura 13 – Arranjo de Sistema original *TDR* para coleta de dados sobre umidade volumétrica do solo: (a) Sensor *TDR* da *Soil Moisture Equipment Corp.* (b) Sistema de coleta de dados *TDR100* da *Campbell Scientific* (modificado de Azevedo, 2012).

Apesar de o sistema convencional de *TDR* ser geralmente adequado para uma ampla variedade de solos, sua acurácia diminui para altos valores de umidade, solos salinos ou argilas altamente condutivas (Zornberg & McCartney, 2007). Suas limitações incluem o custo relativamente alto dos sensores e cabos e procedimentos de instalação comparativamente mais complicados para prevenir danos aos sensores.

Reflectômetros de umidade ou *WCR* (*Water Content Reflectômetros*) são sensores que têm sido cada vez mais usados como alternativa a sensores *TDR* convencionais (Dwyer, 1998). Sensores *WCR* medem a umidade volumétrica, medindo a constante dielétrica do solo, similar ao *TDR*. A Figura 14 apresenta o modelo de sensor ECH2O EC-5, fabricado pela *Decagon Devices*.



Figura 14 – Detalhe do sensor de umidade ECH2O EC-5 utilizado por de Lima (2014) (Fonte: www.decagon.com).

O sensor EC-5 é um sensor de baixo custo que calcula a umidade volumétrica do meio a partir de equações de calibração próprias (de Lima, 2014). As dimensões do sensor de umidade ECH2O EC-5, informadas pelo fabricante, são de 8,9 cm de comprimento, 1,8 cm de largura e 0,7 cm de espessura.

Entretanto, *WCRs* usam circuitos eletrônicos menores localizados dentro do próprio sensor que geram um pulso eletromagnético de baixa frequência (aproximadamente, 40 MHz). Sensores *WCR* necessitam de menos energia e permitem instalar cabos mais compridos que os utilizados nos *TDRs* convencionais. Além disso, sensores *WCR* podem usar dataloggers convencionais externos, mais simples que os requeridos pelos *TDRs*, o que torna esse tipo de sensor mais atraente para aplicações de campo.

Apesar de todas essas vantagens, o uso de frequências comparativamente menores pode resultar em um decréscimo da resolução das medidas de umidade volumétrica e ainda para correlações em solos com maior condutividade elétrica ou variação de temperatura (Kim & Benson, 2002).

A Figura 15 mostra detalhe do recipiente onde é mantido o *datalogger* e detalhe do equipamento aberto e exposto com as cinco portas de entrada para leitura dos sensores utilizados nos ensaios. A figura ilustra o *datalogger* EM 50 da *Decagon*, que pode ser programado para coletar os dados de umidade volumétrica em intervalos regulares de tempo.



Figura 15 – Recipiente de proteção do *datalogger* e detalhe do equipamento aberto com as conexões para os sensores (Fonte: www.decagon.com)

Medidas de sucção podem também ser feitas para complementar as informações coletadas sobre umidade volumétrica no perfil de solo. O monitoramento dos valores de sucção e da umidade podem providenciar dados adequados para interpretar o desempenho da cobertura evapotranspirativa. Especificamente, medidas de sucção e umidade volumétrica podem prover informações para determinação *in situ* das curvas de retenção de água ou *SWRC* (*Soil Water Retention Curve*). Isso pode ser utilizado para interpretar a curva de retenção de água durante ciclos de molhagem e secagem, como na ocorrência de precipitações pluviométricas, fenômenos na interface das camadas como a quebra capilar (*capillary break*), as medidas de campo podem ser utilizadas para aperfeiçoar a utilização da *SWRC* em modelos de simulação numérica.

Um exemplo de sensor de sucção é o MPS-1, da *Decagon Devices*, um sensor que utiliza o potencial dielétrico da água para determinar a sucção do meio. O sensor consiste em uma pedra porosa que, ao entrar em equilíbrio com o meio no qual está inserido, determina o potencial (em kPa) e a temperatura do meio (em graus Celsius). A Figura 16 apresenta o sensor MPS-1, utilizado por de Lima (2014) em seu trabalho sobre barreiras capilares.



Figura 16 – Detalhe do sensor MPS-1 colocado sobre a superfície de uma camada de areia dentro do cilindro de execução da coluna.

Para se analisar a interação entre sistemas convencionais de cobertura que utilizam solos com baixa condutividade hidráulica, e sistemas alternativos que combinam o uso de solos com geossintéticos, McCartney *et al.* (2005) realizaram uma série de ensaios em colunas de médio porte, devidamente instrumentadas com medidores de umidade usando tecnologia *TDRs* (*Time Domain Reflectometry*).

Nos testes realizados por McCartney *et al.* (2005), a análise do fluxo de saída indicou que o comportamento da camada drenante de geossintético é governado tanto pelo geossintético quanto pela camada superior de solo, dependendo se o solo que está em contato com a camada drenante está saturado ou não. Quando o perfil do solo superior está não saturado, a condutividade hidráulica não saturada da camada do geocomposto drenante controla o fluxo, porque age como uma barreira. Depois que a barreira é rompida (*breakthrough*), a condutividade hidráulica da camada de solo, uma argila de baixa plasticidade, controla o fluxo através do perfil, já que a quebra capilar não será mais desenvolvida na interface entre o solo e o geossintéticos, a não ser que o fluxo de entrada no sistema cesse.

O estudo de McCartney *et al.* (2005) chega à importante conclusão de que, em um sistema de cobertura não saturada, uma camada de geossintético drenante em contato com um solo não saturado se comporta de forma similar a uma camada drenante de areia con-

vencional, desenvolvendo uma quebra capilar que resulta na formação de uma barreira ao fluxo e acúmulo de água acima da interface drenante. A camada do geocomposto drenante conduz a um aumento do armazenamento de umidade ao longo da profundidade da camada de solo, bem acima do esperado para um solo com interface com dreno livre, melhorando a capacidade de campo do perfil.

4. CONCLUSÕES

O capítulo procurou apresentar uma visão geral sobre a utilização dos princípios dos solos não saturados para o projeto e execução de coberturas evapotranspirativas em áreas de disposição de resíduos sólidos ou materiais contaminantes. Foram descritos alguns dos modelos de cobertura evapotranspirativa mais utilizados em soluções de engenharia, com destaque à barreira capilar como um sistema eficaz para regiões de clima árido ou semiárido.

Dentro de um conceito de barreira capilar como solução de projeto em uma barreira evapotranspirativa, procurou-se dar destaque à utilização de diferentes materiais para potencializar a capacidade do sistema em reter água ou armazenar umidade.

De Lima (2014) realizou uma série de ensaios de coluna instrumentada simulando diferentes configurações de cobertura evapotranspirativa no modelo de barreira capilar. Concluiu-se que, quando utilizado como elemento de uma cobertura evapotranspirativa, como no caso da barreira capilar, a presença do geotêxtil não tecido potencializa a capacidade do solo de cobertura em reter umidade, mesmo em situações próximas à saturação. As características hidrofóbicas do material ajudam a reter o fluxo descendente de água e proporcionam o acúmulo da umidade na camada superior de solo até que a umidade possa ser eliminada por evapotranspiração.

Por se tratar de uma solução de engenharia ainda não prevista em norma, a utilização do conceito de barreira capilar em uma cobertura evapotranspirativa exige a devida caracterização do comportamento hidráulico dos materiais envolvidos e a realização de simulações numéricas ou testes em escala reduzida para testar diferentes configurações geométricas do projeto ou diferentes materiais geotécnicos e a espessura de cada camada a ser executada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, M. (2012) Anti-Capillary Barrier Performance of Wicking Geotextiles. Dissertação de Mestrado. Universidade do Texas/Austin. pp. 212.

BOUAZZA, A., ZORNBERG, J.G., MCCARTNEY, J.S. & NAHLAWY, H. (2006) Significance of unsaturated behaviour of geotextiles in earthen structures. *Australian Geomechanics*, (41): 133-141.

DE LIMA, M.J. (2014). Utilização de geotêxtil não tecido como elemento constituinte de barreiras capilares. Tese de Doutorado, Publicação GTD - 095/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p. Dwyer (1998)

GARDONI, M.G.A. (1995). Avaliação da aplicabilidade de ensaios de laboratório e critérios de filtros para a utilização de geotêxteis em solos do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM 024A/95, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 177 p.

GARDONI, M.G.A. (2000) Estudo do Comportamento Dreno-Filtrante de Geossintéticos sob Compressão. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 313 p.

HEIBAUM, M. (2010). Geosynthetics in agricultural and aquacultural applications. 9th International Conference on Geosynthetics, Brasil. 259-271.

HENRY, K. and PATTON, S. (1998). "Measurements of the contact angle of water on geotextile fibers." *Geotextile Test. Journal*. 21(1): 11-17.

KIM, K.C. and BENSON, C.H. (2002), Moisture Content Calibrations for Final Cover Soils, University of Wisconsin-Madison Geotech. Eng. Report 02-12, Madison, WI, 122 p.

McCARTNEY, J.S., KUHN, J.A., and ZORNBERG, J.G. (2005). "Geosynthetic Drainage Layers in Contact with Unsaturated Soils." *Proceedings of the Sixteenth International Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*, Osaka, Japan. 2301-2305.

McCARTNEY, J.S., VILLAR, L.F.S., and ZORNBERG, J.G. (2007). Estimation of the Hydraulic Conductivity Function of Unsaturated Clays using Infiltration Column Tests. *Sixth Brazilian Symposium on Unsaturated Soils, Salvador, Brazil*, 1: 321-328.

MCCARTNEY, J.S., VILLAR, L.F.S., & ZORNBERG, J.G. (2008). Nonwoven geotextiles as hydraulic barriers to capillary rise. *Proceedings of GeoAmericas 2008, the First Pan-American Geosynthetics Conference and Exhibition, Cancún, México*. 252-261.

MEYER, P.D. and GEE, G.W. (1999). "Flux-based estimation of field capacity." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 125, 595-599.

MORRIS, C.E. & STORMONT, J.C. (1999). Parametric study of unsaturated drainage layers in a capillary barrier. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 12 (125): 1057-1065.

MORRIS, C.E., & STORMONT, J.C. (1997). Capillary barriers and sub-title D covers: Estimating equivalency. *Journal of Environmental Engineering, ASCE* 123 (1): 3-10.

OLSON, R.E. and LANGFELDER, L.J. (1965). "Pore water pressures in unsaturated soils." *Journal of the Soil Mechanical and Foundation Division ASCE*, 91, 127-151.

PARK, K.D., FLEMING, I.R. (2006). Evaluation of a Geosynthetic Capillary Barrier. *Geotextiles and Geomembranes*, 24: 64-71

STORMONT, J. (1995). "The effect of constant anisotropy on capillary barrier performance." *Water Resources Res.* 32, 783-785.

STORMONT, J.C. and MORRIS, C.E. (2000). "Characterization of unsaturated nonwoven geotextiles." In *Advances in Unsaturated Geotechnics: Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000*. Chang, N.-Y., Houston, S.L., and Shackelford, C.D. (eds) August 5-8, 2000. Denver, Colorado. pp. 153-164.

TATTO, J. (2010) *Comportamento Filtrante de Geotêxteis Não Tecidos sob Diferentes Condições de Apoio*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 172 p.

van GANUCHTEN, M. TH. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Society of America Journal*, 44: 153-164.

WAUGH, W.J., PETERSEN, K.L., LINK, S.O., BJORNSTAD, B.N., and GEE, G.W. (1994). "Natural analogs of the long term performance of engineered covers." In *situ Remediation: Scientific Basis for Current and Future Technologies*, Gee, G.W. and Wing, N.R. (eds), Battelle Press, Richland Washington. pp. 379-409.

WILLIAMS, L., HOYT, D., DWYER, S., HARGREAVES, G., and ZORNBERG, J.G. (2011). *Design Criteria and Construction of a Capillary Barrier Cover System: The Rocky Mountain Arsenal Experience*. GeoFrontiers 2011 Conference, Geo-Institute of ASCE, Dallas, Texas: 996-1005.

ZORNBERG, J.G. and McCARTNEY, J.S. (2003). Analysis of monitoring data from the evapotranspirative test covers at the Rocky Mountain Arsenal. *Geotechnical Research Report*, US Environmental Protection Agency, Region 8, December 2003, 227 p.

ZORNBERG, J.G., and McCARTNEY, J.S. (2007). *Evapotranspirative Cover Systems for Waste Containment*. The Handbook of Groundwater Engineering, 2nd Edition, Jacques W. Delleur (Editor-in-Chief), CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, pp 34.1-34.31.

ZORNBERG, J.G., BOUAZZA, A. & McCARTNEY, J.S. (2010). Geosynthetic capillary barriers: current state of knowledge. *Geosynthetics International*, 17 (5): 273-300.

ZORNBERG, J.G., BOUAZZA, A., and McCARTNEY, J.S. (2009). *Geosynthetic Capillary Barriers: Principles and Applications*. Invited Keynote Lecture, Proceedings of the First African Conference on Geosynthetics, GeoAfrica 2009, Cape Town, South Africa. 1-39

ZORNBERG, J.G., JERNIGAN, B.L., SANGLERAT, T.R., and COOLEY, B.H. (1999). "Retention of free liquids in landfills undergoing vertical expansion." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE, 125, 583-594.

ZORNBERG, J.G., LaFOUNTAIN, L., and CALDWELL, J.C. (2003). "Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE. 129, 427-438.