

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**UTILIZAÇÃO DE GEOTÊXTIL NÃO TECIDO COMO ELEMENTO
CONSTITUINTE DE BARREIRAS CAPILARES.**

MARLON JOSÉ DE LIMA

ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO GTD – 095/14

BRASILIA, 03 DE JUNHO DE 2014.

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**UTILIZAÇÃO DE GEOTÊXTIL NÃO TECIDO COMO ELEMENTO
CONSTITUINTE DE BARREIRAS CAPILARES.**

MARLON JOSÉ DE LIMA

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

APROVADA POR:

**ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph.D. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**GREGÓRIO LUÍS SILVA ARAÚJO, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**GILSON GITIRANA JR., Ph.D. (UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**MARIA DAS GRAÇAS GARDONI ALMEIDA, D.Sc. (UFMG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 03 DE JUNHO DE 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

DE LIMA, M. J.	
Utilização de geotêxtil não tecido como elemento constituinte de barreiras capilares.	
[Distrito Federal] 2014	
xxi, p., 128 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2014)	
Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.	
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental	
1. Geossintéticos	2. Barreira capilar
3. Não saturado	4. Infiltração
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Marlon José de Lima

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Utilização de geotêxtil não tecido como elemento constituinte de barreiras capilares.

GRAU / ANO: Doutor / 2014

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Marlon José de Lima

SMAS Trecho 1 Lote C Bloco I Apt. 404

CEP.:71218-010 – Brasília/DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

A Deus, presença constante durante toda minha vida. Nele vivemos, e nos movemos, e existimos.

Ao professor Ennio Marques Palmeira, pela confiança, pelo apoio e pelo exemplo como pessoa e cientista.

Ao professor Manoel Porfírio Cordão Neto, amigo e confidente, obrigado pela companhia ao longo destes anos e pelo exemplo de superação.

Ao professor Jorge Gabriel Zornberg, pelo suporte e orientação durante meu doutorado sanduíche na Universidade do Texas em Austin.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Geotecnia, pelo conhecimento, pelos ensinamentos, pelo privilégio do convívio e pelo exemplo de perseverança.

A meus pais, José Porfírio de Lima e Judite Porfírio de Lima, de saudosa memória, pelo sustento e exemplo durante todo nosso tempo de convivência. Ilustrados, mas doutores na arte de viver e conviver.

A minha esposa Gilvana e minha filha Júlia, por me acompanharem e serem pacientes comigo durante esta caminhada. Vocês são minha maior motivação.

Aos colegas do Programa de Pós Graduação em Geotecnia pela convivência e amizade, principalmente aos membros da “diretoria”: Camilla, Leonardo, Bruna, Janaína e Rosely. Vocês tornaram este caminho um pouco mais suave.

Aos colegas da Universidade do Texas em Austin pela ajuda durante aquele ano de aprimoramento científico e ampliação de horizontes, em especial a Michael Plaster, Hussein Hoodi, Júlio Zambrano, Marcelo Azevedo e Carmen Castro.

Aos meus familiares, especialmente meus irmãos Adegadiano, Alosmano, Josimar e Luzimar, pelo apoio e pela amizade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico- CNPq, pelo apoio financeiro, pelo suporte e pela licença de minhas atividades de analista para dedicação exclusiva a esta pesquisa.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro e pelo suporte na realização de meu doutorado sanduíche.

A Universidade de Brasília, por me receber e dar a estrutura necessária para desenvolver os trabalhos.

A Universidade do Texas em Austin, por todo o suporte durante o período de doutorado sanduíche.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a utilização de um geotêxtil não tecido em substituição ao solo granular na composição de um sistema de barreira capilar. Foram realizados diversos ensaios de infiltração em coluna, combinando camadas de solo fino com geotêxteis não tecidos com massas por unidade de área iguais a 200 g/m², 300 g/m² e 400 g/m², além de materiais granulares como areia e pedregulho.

A barreira capilar é uma opção de projeto de cobertura evapotranspirativa para áreas destinadas a disposição de resíduos sólidos. Seu funcionamento considera o contraste entre as propriedades hidráulicas de uma camada de solo fino sobreposto a uma camada de material granular, resultando em impedância hidráulica, limitando o movimento do fluxo de água. Neste sistema, a camada superficial de solo funciona como um depósito de umidade, retendo a água da chuva e devolvendo à atmosfera pelos processos naturais de evaporação e transpiração.

Para melhor compreensão do comportamento hidráulico dos geotêxteis foram realizados ensaios de coluna suspensa, para determinação das curvas de retenção de água. A condutividade hidráulica não saturada dos geotêxteis foi estimada pela metodologia de van Genuchten (1980). Foi desenvolvido um equipamento utilizando a metodologia do ponto de bolha (*bubble point test*) para determinação da curva de distribuição de tamanho de poros dos geotêxteis não tecidos utilizados nos ensaios de infiltração em coluna. Os resultados obtidos mostraram a eficiência de geotêxteis não tecidos como barreiras capilares.

ABSTRACT

This thesis aimed at evaluating the use of a nonwoven geotextile as a replacement for coarse soil in capillary barriers. Several columns infiltration tests were performed, combining layers of fine soil with nonwoven geotextiles with masses per unit of 200 g/m², 300 g/m² and 400 g/m², in addition to granular materials such as sand and gravel.

The capillary barrier is an option for evapotranspirative cover systems. Its operation considers the contrast between the hydraulic properties of a fine soil layer and a coarse material, resulting in hydraulic impedance that limits the flow of water. The top soil layer acts as a moisture reservoir, retaining infiltration and returning moisture to the atmosphere by natural the processes of evaporation and transpiration.

In order to have a better understanding on the geotextile hydraulic behavior hanging column tests were performed to obtain water retention curves. The geotextile unsaturated hydraulic conductivity was estimated by van Genuchten (1980) methodology. A bubble point test equipment was developed to obtain geotextile pore size distribution. The results obtained showed the efficiency of nonwoven geotextiles as capillary barriers.

ÍNDICE

1. - INTRODUÇÃO	1
1.1 – OBJETIVO GERAL.....	2
1.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 – ESTRUTURA DA TESE	3
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. – USO DE GEOSSINTÉTICOS COMO ELEMENTO DE FILTRAÇÃO E DRENAGEM.....	4
2.2. – GEOSSINTÉTICOS EM COBERTURAS EVAPOTRANSPIRATIVAS	6
2.3. - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO NÃO SATURADO DE UMA BARREIRA CAPILAR	15
2.4. – ANÁLISE DO COMPORTAMENTO NÃO SATURADO DE GEOTÊXTEIS... ..	25
3 - MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 – MATERIAIS UTILIZADOS NOS ENSAIOS.....	39
3.1.1 – SOLOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE COLUNA.....	40
3.1.2 – GEOTÊXTEIS UTILIZADOS NOS ENSAIOS	44
3.2 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS	45
3.2.1 – EQUIPAMENTOS PARA ENSAIOS DE PERFIL DE SOLO EM ENSAIOS DE COLUNA DE PEQUENO PORTE.....	45
3.2.2 - ENSAIO DE COLUNA SUSPensa (<i>HANGING COLUMN TEST</i>) PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DOS GEOTÊXTEIS.....	56
3.2.3 - ENSAIOS DO PONTO DE BOLHA (<i>BUBBLE POINT TEST</i>) PARA OBTENÇÃO DA CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DE POROS.....	59
4 – RESULTADOS E ANÁLISES	65
4.1 – ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO EM COLUNAS DE PEQUENO PORTE.....	65
4.1.1 – COLUNA COM PERFIL DE SOLO RMA TIPO 2	65

4.1.2 – COLUNA COM PERFIL DE SOLO RMA TIPO 2 COM GEOTÊXTIL DE 200 g/m ²	70
4.1.3 – COLUNA COM PERFIL DE SOLO RMA TIPO 2 COM GEOTÊXTIL COM 300 g/m ²	76
4.1.4 – COLUNA COM PERFIL DE SOLO RMA TIPO 2 COM GEOTÊXTIL COM 400 g/m².....	81
4.1.5– COLUNA COM PERFIL DE SOLO RMA TIPO 2 E AREIA MONTEREY Nº 30 COM PRESENÇA DE GEOTÊXTIL NÃO TECIDO DE 200 g/m ²	87
4.1.6– COLUNA COM PERFIL DE SOLO RMA TIPO 2 E AREIA <i>MONTEREY</i> Nº 30 SEM PRESENÇA DE GEOTÊXTIL.	90
4.1.7– COLUNA COM PERFIL DE SOLO RMA TIPO 2 E CAMADA DE PEDREGULHO.	93
4.2 – ENSAIOS EM COLUNA SUSPensa (HANGING COLUMN TEST) PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DE GEOTÊXTEIS.	96
4.2.1 –CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DE GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS.	97
4.2.2 – CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NÃO SATURADA PARA OS GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS ENSAIADOS.	104
4.3 – ENSAIOS DE PONTO DE BOLHA (<i>BUBBLE POINT TEST</i>) PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DE POROS EM GEOTÊXTEIS.	111
4.3.1 – ENSAIOS REALIZADOS NA UNIVERSIDADE DO TEXAS EM AUSTIN.	112
4.3.2 – ENSAIOS REALIZADOS NA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA.....	116
5– CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	122
5.1 – CONCLUSÕES	122
5.2 – SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Aplicações de geotêxtil (Modificado de Bathurst, 2007).....	5
Figura 2.2 - Esquema ilustrando o efeito de ruptura capilar na interface solo-geotêxtil (adaptado de Zornberg <i>et al.</i> , 2009).	8
Figura 2.3 - Barreira capilar com camada drenante (modificado - Morris & Stormont, 1997).	11
Figura 2.4 - Componentes do balanço hídrico em um sistema de cobertura (a) barreira resistiva (b) barreira evapotranspirativa (modificado - Zornberg <i>et al.</i> , 2009).....	13
Figura 2.5 - Diagrama volumétrico de fases para solo não saturado (modificado de Zornberg & McCartney, 2007)	15
Figura 2.6 - Curvas de retenção de água típicas para diferentes materiais geotécnicos (modificado de Zornberg & McCartney, 2007).	17
Figura 2.7 - Ensaio de coluna suspensa - teste convencional usado para amostras de solo (modificado de Zornberg <i>et al.</i> , 2009).....	18
Figura 2.8 - Ensaio de disco de pressão - modo convencional para ensaio de amostras de solo (modificado de Zornberg <i>et al.</i> , 2009).....	19
Figura 2.9 - Técnica termodinâmica para determinar curva de retenção de água em solos (modificado de Zornberg <i>et al.</i> , 2009).....	20
Figura 2.10 - Funções K típicas para diferentes materiais geotécnicos (modificado de Zornberg & McCartney, 2007).....	21
Figura 2.11 - Permeâmetro de coluna instrumentado para determinação da condutividade hidráulica não saturada (modificado de McCartney <i>et al.</i> 2007)	23
Figura 2.12 - Curva característica de um geotêxtil não tecido (modificado de Bouazza <i>et al.</i> , 2006).....	26
Figura 2.13 - Equipamento para obter a curva característica de amostras de geotêxtil (modificado de Stormont <i>et al.</i> 1997).....	28
Figura 2.14 - Esquema de perfil de solos em ensaio de coluna média (modificado de McCartney <i>et al.</i> 2005).....	30
Figura 2.15 - Esquema de ensaio com perfil de solo com 1250 mm de espessura (modificado de McCartney & Zornberg, 2007b).....	32
Figura 2.16 - Curvas obtidas em testes de ponto de bolha (modificado de Eun & Tinjum, 2011).....	36

Figura 2.17 - Curvas de distribuição de poros obtidas pelo ensaio de Ponto de Bolha. (modificado de Eun & Tinjium, 2011).....	37
Figura 3.1 - Amostras de areia Monterey nº30 e de solo RMA Tipo 2 em recipientes de vidro no laboratório de Geotecnia da UT-Austin.	40
Figura 3.2 - Curva granulométrica Solo RMA Tipo II (modificado de McCartney,2007).....	41
Figura 3.3 - Curva de retenção de água para solo RMA Tipo II (modificado de McCartney, 2007b).....	43
Figura 3.4 - Curva granulométrica da areia Monterey nº30 (modificado de McCartney, 2007).	44
Figura 3.5 - Execução de camada de pedregulhos com função drenante e de suporte ao geotêxtil não tecido.	46
Figura 3.6 - Sequência demonstrando a execução de uma camada de solo compactada com a presença de sensores de umidade e pressão: (a) colocação de solo sobre a camada de geotêxtil, (b) posicionamento dos sensores, (c) cobertura dos sensores com solo solto e (d) escarificação da superfície da camada compactada.	47
Figura 3.7 - Detalhe do sensor de umidade ECH ₂ O EC-5 (Fonte: www.decagon.com)	48
Figura 3.8- Recipiente de proteção do datalogger e detalhe do equipamento aberto com as conexões para os sensores (Fonte: www.decagon.com)	49
Figura 3.9 - Curva de calibração específica utilizando solo RMA para o sensor EC-5 ECHO (modificado de Azevedo, 2012).....	50
Figura 3.10 - Detalhe do sensor MPS-1 colocado sobre a superfície de uma camada de areia dentro do cilindro de execução da coluna.	51
Figura 3.11 - Interface do Software <i>ECH2O Utility</i> (Fonte: www.decagon.com).....	52
Figura 3.12 - Coluna para simulação de perfil de cobertura utilizando solo RMA Tipo 2 com presença de geotêxtil não tecido como camada de bloco capilar (camada de pedregulho com função de suporte e dreno)	53
Figura 3.13 - Visão do sistema de molhagem da coluna de solo com as bombas peristálticas de fluxo variável, tubos condutores, reservatório de água e papel filtro para distribuição uniforme do fluxo.....	54
Figura 3.14 - Ensaios em coluna sem a presença de geossintético para observação do fenômeno de barreira capilar. (a) pedregulhos como gramada granular e (b) areia monterey nº30 como camada de solo granular.....	55

Figura 3.15 - Equipamento de coluna suspensa (Hanging Column Apparatus) utilizado para medição da curva característica de geotêxteis.....	57
Figura 3.16 - Detalhe da câmara do ensaio de coluna suspensa onde é instalada a amostra a ser ensaiada.	58
Figura 3.17 - Vista do equipamento para realização do ensaio de ponto de bolha montado no Laboratório de Geotecnia da UT-Austin.	60
Figura 3.18 - Sequência de montagem da amostra de geotêxtil dentro da célula. (a) Célula aberta com orifício para drenagem de água; (b) tela perfurada para apoio da amostra, (c) colocação da amostra de geotêxtil saturada; (d) Célula fechada e pronta para início do ensaio.	61
Figura 3.19 - Equipamento montado na Universidade de Brasília para determinação da curva de distribuição de poros em geossintéticos pela metodologia do ponto de bolha.....	62
Figura 3.20 - Detalhes da célula utilizada no ensaio de ponto de bolha na Universidade de Brasília, (a) célula vazia com a placa perfurada; (b) amostra de geotêxtil instalada na célula.	63
Figura 4.1 - Esquema com posição dos sensores de umidade para ensaio de infiltração em perfil de solo RMA Tipo 2.	66
Figura 4.2 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o volume infiltrado de água para uma coluna de solo RMA Tipo 2.	67
Figura 4.3 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o tempo de infiltração para coluna de solo RMA Tipo 2.	69
Figura 4.4 -- Variação da umidade volumétrica ao longo do perfil de solo RMA Tipo 2 em função do volume de água infiltrado.	70
Figura 4.5 - Esquema com posição dos sensores de umidade para ensaio de infiltração em perfil composto de solo RMA Tipo 2 com presença de geotêxtil com 200 g/m ² de gramatura.	71
Figura 4.6 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o volume de água infiltrada - Perfil de solo RMA Tipo 2 com geotêxtil com 200 g/m ²	72
Figura 4.7 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o tempo de infiltração. Perfil de solo RMA Tipo 2 com a presença de geotêxtil de 200 g/m ²	74
Figura 4.8 - Variação dos valores de sucção e umidade volumétrica em relação ao volume infiltrado no perfil de solo RMA Tipo 2 e geotêxtil com gramatura de 200 g/m ²	75
Figura 4.9 - Variação da umidade volumétrica em função do volume infiltrado, ao longo do perfil de solo RMA Tipo 2 com geotêxtil de 200 g/m ²	76

Figura 4.10 - Esquema com posição dos sensores de umidade para ensaio de infiltração em perfil composto de solo RMA Tipo 2 com presença de geotêxtil com 300 g/m ² de gramatura.	77
Figura 4.11 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o volume de água infiltrada - Perfil de solo RMA Tipo 2 com geotêxtil com 300 g/m ²	78
Figura 4.12 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o tempo de infiltração. Perfil de solo RMA Tipo 2 com a presença de 300 g/m ²	79
Figura 4.13 - Variação do perfil de umidade ao longo do perfil, coluna com solo RMA Tipo 2 e geotêxtil de 300 g/m ²	80
Figura 4.14 - Esquema com posição dos sensores de umidade para ensaio de infiltração em perfil composto de solo RMA Tipo 2 com presença de geotêxtil com 400 g/m ² de massa por unidade de área.	81
Figura 4.15 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o volume de água infiltrada - Perfil de solo RMA Tipo 2 com geotêxtil com 400 g/m ²	82
Figura 4.16 - Variação da umidade volumétrica com o tempo de infiltração. Perfil de solo RMA Tipo 2 e geotêxtil com gramatura de 400 g/m ²	83
Figura 4.17 -- Variação do perfil de umidade ao longo do perfil, coluna com solo RMA Tipo 2 e geotêxtil de 400 g/m ²	84
Figura 4.18 - Valores de sucção e umidade volumétrica em relação ao tempo de infiltração no perfil de solo RMA Tipo 2 e geotêxtil com 400 g/m ² a uma profundidade de 15,5 cm.	85
Figura 4.19 - Comparação entre variações da umidade volumétrica próximo da interface solo-geotêxtil para geotêxteis com 200 g/m ² , 300 g/m ² e 400 g/m ² e perfil de solo RMA Tipo 2 sem a presença de geotêxtil.	86
Figura 4.20 - Posição dos sensores de umidade para o ensaio de infiltração em perfil composto de solo RMA Tipo 2 com presença de geotêxtil de 200 g/m ² e areia <i>Monterey</i> n°30.	87
Figura 4.21 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o volume infiltrado. Perfil de solo RMA Tipo 2 com a presença de geotêxtil de 200 g/m ² e camada de apoio em areia <i>Monterey</i> n°30.	88
Figura 4.22 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o tempo de infiltração. Perfil de solo RMA Tipo 2 com a presença de geotêxtil com 200 g/m ² e camada de apoio em areia <i>Monterey</i> n°30, sem presença de geotêxtil.	89

Figura 4.23 - Posição dos sensores de umidade para ensaio de infiltração em perfil composto de solo RMA Tipo 2 e areia <i>Monterey</i> nº30.....	90
Figura 4.24 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o tempo de infiltração - Perfil de solo RMA Tipo 2 e areia <i>Monterey</i> nº30.	91
Figura 4.25 - Variação do perfil de umidade ao longo do perfil, coluna com solo RMA Tipo 2 e areia <i>Monterey</i> nº30 sem a presença de geotêxtil.....	92
Figura 4.26 - Posição dos sensores de umidade para ensaio de infiltração em perfil composto de solo RMA Tipo 2 e pedregulho.	93
Figura 4.27 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o tempo de infiltração - Perfil de solo RMA Tipo 2 e camada de pedregulho sem a presença de geotêxtil.	94
Figura 4.28 - Detalhe da interface entre solo compactado e pedregulho no ensaio de infiltração sem presença de geotêxtil.....	95
Figura 4.29 - Variação do perfil de umidade ao longo do perfil, coluna com solo RMA e pedregulho, sem a presença de geossintético.	95
Figura 4.30 - Curva de retenção de água para geotêxtil não tecido com massa por unidade de área de 200 g/m ²	97
Figura 4.31 - Curva de retenção de água para geotêxtil não tecido de 200 g/m ² considerando o grau de saturação da amostra.	98
Figura 4.32 - Curva de retenção de água para geotêxtil não tecido de 300 g/m ² considerando a umidade volumétrica da amostra.....	100
Figura 4.33 - Curva de retenção de água para geotêxtil não tecido de 300 g/m ² considerando a saturação da amostra.	100
Figura 4.34 - Curva de retenção de água para geotêxtil não tecido de 400 g/m ² considerando a umidade volumétrica da amostra.....	101
Figura 4.35 - Curva de retenção de água para geotêxtil não tecido de 400 g/m ² considerando a saturação da amostra.	102
Figura 4.36 - Comparação entre curvas de retenção de água de geotêxteis com diferentes massas por unidade de área considerando o ramo de secagem e a umidade volumétrica das amostras.....	103
Figura 4.37 - Comparativo entre curvas de retenção de água de geotêxteis ensaiados com diferentes gramaturas, considerando o ramo de secagem e a saturação das amostras.	104
Figura 4.38 - Ajuste dos dados experimentais da curva de retenção de água do geotêxtil de 200 g/m ² utilizando o modelo de van Genuchten (1980).	105

Figura 4.39 - Determinação da função da condutividade hidráulica não saturada, a partir do ajuste da curva de retenção de água utilizando o modelo van Genutchen-Mualem (1980) - geotêxtil de 200 g/m ²	106
Figura 4.40 - Função da condutividade hidráulica não saturada utilizando o modelo van Genutchen-Mualem (1980) - geotêxtil de 200 g/m ²	107
Figura 4.41 - Ajuste dos dados experimentais da curva de retenção de água do geotêxtil de 300 g/m ² utilizando o modelo de van Genutchen (1980).	108
Figura 4.42 - Determinação da função da condutividade hidráulica não saturada, a partir do ajuste da curva de retenção de água, utilizando o modelo van Genutchen-Mualem (1980) para geotêxtil não tecido com gramatura de 300 g/m ²	108
Figura 4.43 - Função da condutividade hidráulica não saturada utilizando o modelo van Genutchen-Mualem (1980) - geotêxtil de 300 g/m ²	109
Figura 4.44 - Ajuste dos dados experimentais da curva de retenção de água do geotêxtil de gramatura 400 g/m ² utilizando o modelo de van Genutchen (1980).	110
Figura 4.45 - Determinação da função da condutividade hidráulica não saturada a partir do ajuste da curva de retenção de água utilizando o modelo van Genutchen-Mualem (1980) - geotêxtil de 400 g/m ²	110
Figura 4.46 - Função da condutividade hidráulica não saturada utilizando o modelo van Genutchen-Mualem (1980) - geotêxtil de 400 g/m ²	111
Figura 4.47 - Volume de ar versus pressão - Geotêxtil de 200 g/m ²	113
Figura 4.48 - Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 200 g/m ²	113
Figura 4.49 - Volume de ar versus pressão - Geotêxtil de 300 g/m ²	114
Figura 4.50 - Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 300 g/m ²	114
Figura 4.51 - Volume de ar versus pressão - Geotêxtil de 400 g/m ²	115
Figura 4.52 - Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 400 g/m ²	115
Figura 4.53 - Volume de ar versus pressão - Geotêxtil de 200 g/m ² .- Ensaio na UnB.	117
Figura 4.54 - Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 200 g/m ² - ensaio realizado com equipamento montado na Universidade de Brasília.	117
Figura 4.55 - Volume de ar versus pressão - Geotêxtil de 300 g/m ² .- Ensaio na UnB.	118
Figura 4.56 - Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 300 g/m ² - ensaio realizado com equipamento montado na Universidade de Brasília.	118

Figura 4.57 - Gráfico com dados sobre volume de ar passando pela amostra nos ensaios com amostra molhada e amostra seca. Amostra de geotêxtil não tecido com 400 g/m ² , ensaio realizado com equipamento montado na Universidade de Brasília.	119
Figura 4.58 - Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil não tecido com gramatura de 400 g/m ² , ensaio realizado com equipamento montado na Universidade de Brasília.	119

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características físicas dos geotêxteis não tecidos utilizados (modificado de Gardoni (2010) e Gardoni (1995).....	45
Tabela 4.1 - Frequência de ocorrência de tamanho de poros para os geotêxteis ensaiados na Universidade do Texas em Austin.	116
Tabela 4.2. Tamanhos de poros para geotêxteis ensaiados na Universidade de Brasília.....	120

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área seccional
ASTM	American Society of Testing and Materials
B	constante capilar
cm	centímetro
cm ²	centímetro quadrado
cm ³	centímetro cúbico
cos	cosseno
d	diâmetro do poro para a pressão
d _f	diâmetro da fibra
D _i	diâmetro efetivo
e	índice de vazios.
g	grama
G _s	densidade relativa dos grãos
Gs	peso específico dos grãos
H	carga hidráulica
h _c	altura da ascensão capilar
IP	índice de plasticidade
Kg	quilograma
kPa	kilopascal
K _{sat}	condutividade hidráulica saturada
m	metro
m ²	metro quadrado
m.c.a.	metros de coluna de água
ml	mililitros
mm	milímetro
N	Newton
n	parâmetro de forma adimensional
O _i	diâmetro equivalente
P	pressão
P _a	pressão de ar nos poros

PVC	cloreto de polivinila
P_w	pressão de água nos poros
R	raio
RMA	Rocky Mountain Arsenal
S	grau de saturação
s	segundos
T	tensão superficial
TDR	Time Domain Reflectometer
u_w	poropressão
V_a	volume de ar
V_s	volume de sólidos
V_t	volume total
V_w	volume de água
w_c	umidade gravimétrica de compactação
w_i	umidade gravimétrica inicial
w_L	limite de liquidez
w_p	limite de plasticidade
z	altura
γ_{max}	densidade máxima
ψ	sucção mátrica
Ψ_{aev}	valor de entrada de ar
Ψ_{wev}	valor de entrada de água
ψ	sucção mátrica
Δt	intervalo de tempo
ΔV_{wi}	volume de água que passa pelo ponto i na secção de um perfil
α	parâmetro de forma com unidade em kPa^{-1}
γ	o ângulo de contato de molhagem
θ	umidade volumétrica
θ_r	umidade volumétrica residual
θ_s	umidade volumétrica saturada
ρ_w	densidade da água
σ_{aw}	tensão superficial entre água e ar

1. - INTRODUÇÃO

A necessidade de prover um destino adequado aos resíduos sólidos gerados pela atividade humana tem sido, há 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.

A utilização de geossintéticos em combinação, ou em substituição, às camadas de solo na cobertura final de depósitos de resíduos sólidos é uma alternativa tecnológica amplamente utilizada em países desenvolvidos, com considerável sucesso, como relatam diversos autores (McCartney *et al.*, 2005; Bouazza *et al.*, 2006; Park & Fleming, 2006).

Para climas áridos e semiáridos, ou ainda com longos períodos de estiagem, as coberturas evapotranspirativas - arranjo baseado no comportamento hidráulico dos solos não saturados - é uma opção para cobertura final em depósitos de resíduos sólidos. Na cobertura evapotranspirativa, o maior desafio tecnológico não é impedir a infiltração de água para dentro da barreira, mas permitir que, uma vez a frente de umidade tenha avançado para dentro do sistema, esta umidade seja retida e armazenada dentro da barreira capilar. Posteriormente, esta água é eliminada por evaporação, por fatores térmicos e ambientais, antes que a frente de molhagem avance para dentro da camada de resíduos sólidos.

A barreira capilar é um dos exemplos de cobertura evapotranspirativa que, utilizando o contraste entre as condutividades hidráulicas de solos finos e granulares, tenta aumentar a capacidade de retenção de água da camada de cobertura, evitando o contato da frente de umidade com a camada de resíduos sólidos. Neste contexto a tese desenvolvida compreende o estudo do comportamento de sistemas de cobertura com barreiras capilares utilizando

geossintéticos em substituição a solos granulares. Pretende-se verificar se a presença de geotêxteis não tecidos aumenta a eficiência do sistema de cobertura, ou altera o seu balanço hídrico no que diz respeito à capacidade de reter água e evitar seu contato com o resíduo sólido depositado.

Para alcançar os objetivos propostos, além de uma adequada revisão bibliográfica, foram realizados ensaios de laboratório utilizando materiais granulares e geotêxteis, tanto para determinar o comportamento hidráulico dos materiais quanto simular o comportamento em campo de camadas de cobertura evapotranspirativas.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília bem como no laboratório do grupo de geossintéticos da Universidade do Texas, em Austin

1.1 – OBJETIVO GERAL

Estudar o desempenho de barreiras capilares compostas com a presença de geossintéticos como alternativa a barreiras hidráulicas convencionais, em sistemas de cobertura final de aterros sanitários.

1.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender o comportamento hidráulico não saturado de geotêxteis não tecidos com a realização de ensaios para determinação da curva de retenção de água em geossintéticos de diferentes espessuras e gramaturas.
- Determinar a função da condutividade hidráulica dos geotêxteis utilizados.
- Desenvolver equipamentos para melhor compreensão da estrutura porosa de geotêxteis não tecidos realizando ensaios para determinação da curva de distribuição de poros ou constrições.
- Observar o comportamento hidráulico de diferentes arranjos de barreira capilar, utilizando solos e geossintéticos, realizando ensaios de infiltração em colunas.

1.3 – ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está dividida em 5 capítulos, a seguir uma breve descrição do conteúdo presente em cada um deles.

O presente capítulo traz a introdução ao trabalho, com uma descrição preliminar sobre a tese. Apresenta ainda o objetivo geral da pesquisa e seus objetivos específicos.

O Capítulo 2 contém a revisão bibliográfica, com todo o embasamento teórico que orientou a realização dos ensaios e as análises dos resultados.

O Capítulo 3 ilustra os materiais, equipamentos e métodos utilizados no desenvolvimento dos trabalhos. São detalhados os procedimentos para ensaios de infiltração em colunas, utilização do equipamento de coluna suspensa, sendo descritos a montagem e instalação do equipamento para estimar a curva de distribuição de poros, pelo método do ponto de bolha.

O Capítulo 4 é dedicado à apresentação e análise dos resultados dos ensaios e dos procedimentos realizados ao longo da tese.

O Capítulo 5 descreve as conclusões da tese e sugestões para pesquisas futuras.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. – USO DE GEOSSINTÉTICOS COMO ELEMENTO DE FILTRAÇÃO E DRENAGEM

Geossintéticos são materiais poliméricos utilizados em aplicações geotécnicas, ambientais e hidráulicas. Existem diversos tipos de geossintéticos que podem cobrir uma grande gama de aplicações. Uma categoria de geossintéticos com amplo uso em obras hidráulicas é a dos geotêxteis, que podem cumprir grande número de funções possíveis, com exceção da função de impermeabilização, a menos que seja impregnado com material de baixíssima permeabilidade.

Existem basicamente dois tipos de geotêxteis: tecidos e não tecidos. Geotêxteis tecidos são manufaturados usando métodos tradicionais de tecelagem e são comumente mais usados para reforço de solos. Geotêxteis não tecidos são manufaturados agulhados ou ligados por aquecimento ou resina e são mais utilizados em drenagem, filtração, proteção e separação.

Em alguns projetos opta-se por arranjos utilizando geocompostos produzidos para fins de drenagem, sendo estes constituídos de uma camada de georede, geomanta ou geoespaçador, combinada a camada(s) de geotêxtil(eis). A Figura 2.1 ilustra algumas aplicações de geotêxteis em obras de terra.

Em estruturas de terra as funções de drenagem, filtração ou camada resistiva à percolação de líquidos são realizadas, como regra geral, por camadas de solos com diferentes granulometrias e coeficientes de permeabilidade. O uso de geotêxteis não tecidos, ou de geocompostos, para fins de filtração ou drenagem em substituição a materiais granulares pode ser atrativo para utilização em coberturas de aterros sanitários e em sistemas de drenagem e de coleta de lixiviados, por proporcionar melhor controle tecnológico na instalação, rapidez de execução e economia de material de empréstimo.

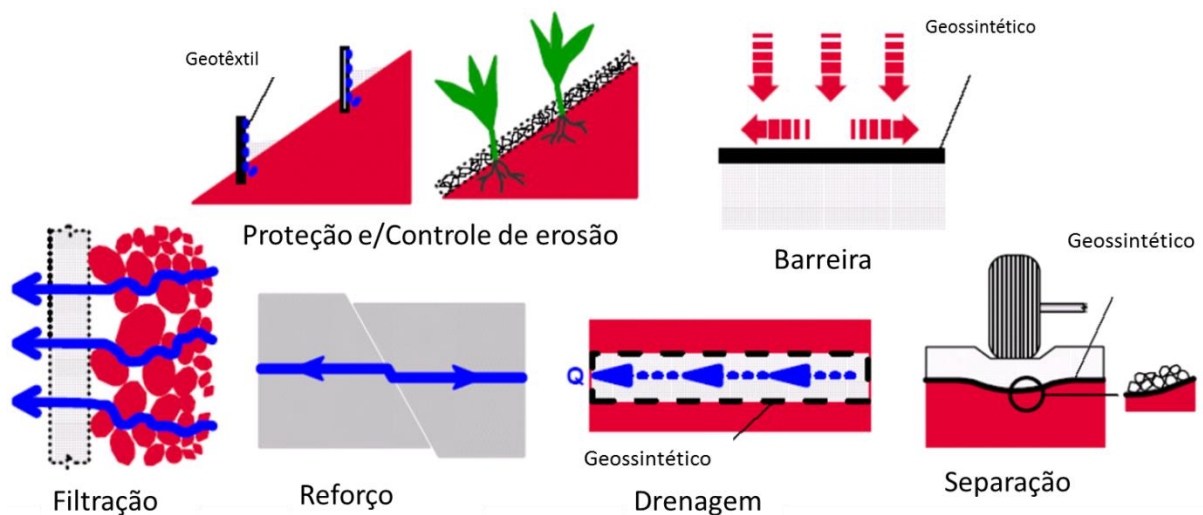


Figura 2.1 - Aplicações de geotêxtil (Modificado de Bathurst, 2007)

Segundo Bouazza *et al.* (2006), nas aplicações de drenagem e filtração em obras de terra, pode-se optar por uma solução com geotêxtil devido às seguintes características: (1) o geotêxtil pode ter condutividade hidráulica adequada para drenar a água tanto na sua direção longitudinal quanto transversal; (2) pode reter partículas do solo adjacente e (3) o geotêxtil pode ser especificado de modo a não colmatar durante a vida útil do sistema. De forma geral, os sistemas de drenagem têm sua condutividade hidráulica analisada considerando o meio como saturado, porém, na maior parte dos casos, estando a camada de drenagem acima do nível do lençol freático, o sistema trabalhará em condição não saturada.

Segundo Palmeira & Gardoni (2000), uma das principais questões a serem observadas quando do uso de geossintéticos em sistemas de drenagem são: possível colmatção (*clogging*) do filtro em curto ou longo prazo, capacidade de retenção do filtro, efeito de altos níveis de tensão nas características hidráulicas do geossintético e colmatção biológica nos sistemas de drenagem em depósitos de resíduos sólidos. Falhas dos sistemas de drenagem podem resultar em sérios problemas de estabilidade ou ambientais. No caso de sistemas de drenagem para instalações para disposição de resíduos sólidos, o problema pode ser ainda mais complexo devido à natureza e características do fluido filtrado, principalmente pela possibilidade de colmatção biológica pela presença de microorganismos.

Palmeira & Gardoni (2002) estudaram as propriedades de filtração e drenagem em geotêxteis não tecidos submetidos a diferentes tensões de confinamento. A preocupação dos autores era determinar os parâmetros de projeto em uma situação de tensão próxima a de campo. Para este estudo foram desenvolvidos equipamentos para medição das propriedades hidráulicas de geotêxteis não tecidos submetidos a tensão de confinamento variando de 0 a 2000 kPa. As propriedades ou dimensões investigadas foram porosidade, espessura, permissividade, transmissibilidade, densidade de fibras e dimensões dos poros.

Os autores observaram que imagens de amostras de geossintéticos sob compressão demonstraram que as aberturas entre os poros (constricções) controlam as características de fluxo. A maior parte das reduções de constricções dos canais de fluxo ocorreram para valores de tensão acima dos 100 kPa. Em amostras de geotêxtil não tecido o confinamento pode aumentar significativamente a capacidade de retenção de partículas. Dependendo do nível de tensão e do tipo de geotêxtil, foi observado que eles podem ser capazes de reter partículas de solo com metade do diâmetro previsto pela prática de projeto corrente. Isto confirmaria que os critérios de retenção usados em projeto, sem considerar altas tensões de confinamento, podem ser significativamente conservadores.

Boauzza *et al.* (2006b) afirmam que o uso de geotêxteis não tecidos para propósito de filtração e drenagem em substituição a solos granulares é muito atrativo em aplicações tais como estradas, cobertura de aterros e barragens de terra, devido à relativa facilidade de instalação e ganho de espaço. Na maioria dos casos, eles são colocados acima do lençol freático onde o solo e os poros do geotêxtil são preenchidos com ar e água (em condições não saturadas). Entretanto, os autores afirmam que a incorporação de geotêxteis nos solos pode influenciar significativamente o movimento de água e dar origem a redistribuição do perfil de umidade, que pode levar a problemas de instabilidade. Isto porque, devido ao próprio processo de manufatura, a maior parte dos geotêxteis é hidrofóbica.

2.2. – GEOSSINTÉTICOS EM COBERTURAS EVAPOTRANSPIRATIVAS

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, onde o 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. Estas 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 de água-ar 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 ainda 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 mensurável de água flua do solo para dentro do geotêxtil não tecido até alcançar uma sucção crítica próxima a zero (saturação). Neste ponto, a água é capaz de romper a resistência e migrar dos poros menores para os poros maiores. Esta sucção crítica, conhecida como sucção de passagem (*breakthrough suction*), geralmente ocorre quando a condutividade hidráulica dos dois materiais não saturados atinge o mesmo valor.

A Figura 2.2 (Zornberg *et al.* 2009) ilustra o fenômeno da ruptura capilar entre camadas de materiais com diferentes tamanhos de poros. Neste caso um solo fino, tendo 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 superar a mudança no raio dos poros, de r_1 para r_2 para forçar o ar a

sair do poro maior. 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 migraria para os poros maiores (r_2) do geotêxtil quando em um valor de sucção significativamente menor, correspondente a sucção gerada nos poros do geotêxtil, relativamente maiores (r_2). Em outras palavras, a energia da água presente nos poros deve ser suficiente para permitir a migração para dentro dos poros maiores da camada de geotêxtil. 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). Neste 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).

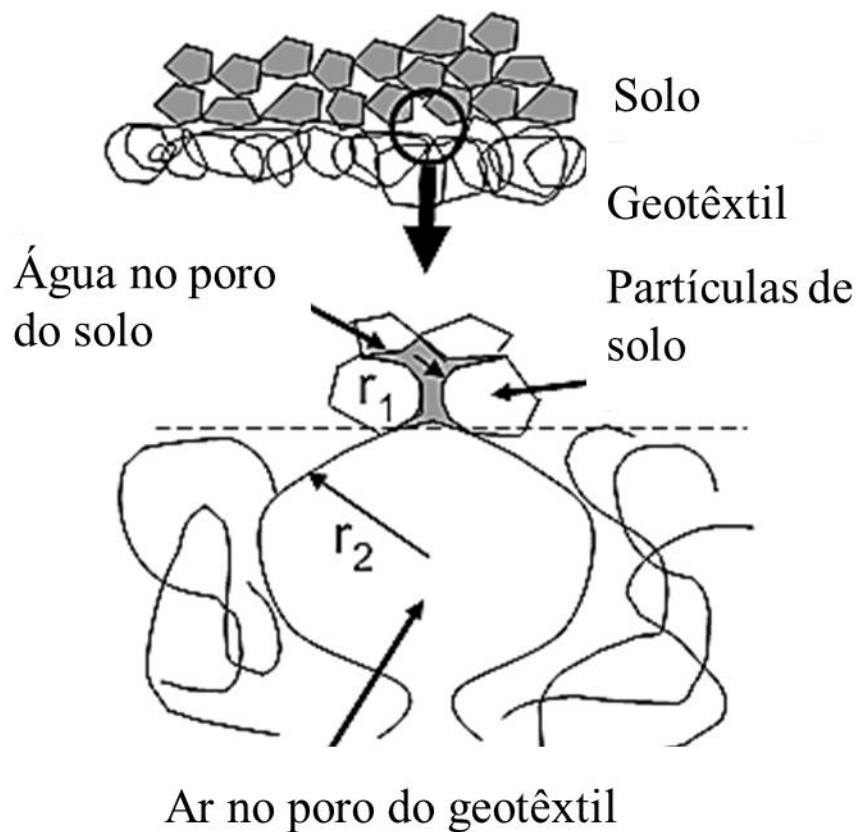


Figura 2.2 - Esquema ilustrando o efeito de ruptura capilar na interface solo-geotêxtil (adaptado de Zornberg *et al.*, 2009).

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 estas 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 igualar ao valor de entrada de ar da camada de solo granular. Este comportamento leva ao acúmulo de umidade e, conseqüentemente, o 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 a 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, colaborar com o sistema evapotranspirativo, favorecer o 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 alta 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 deste tipo de barreira, abaixo do solo cultivado pode ser extremamente sofisticada, portanto deve ser avaliada criteriosamente a 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. Este fenômeno pode levar à situação onde a condutividade hidráulica de um cascalho não saturado ou de 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 & Stormont (1997 e 1999), Park & 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 estas aplicações é interessante reduzir a quantidade de umidade que chegará à camada de resíduo devido, por exemplo, à precipitação pluvial.

Segundo Morris & Stormont (1999) as vantagens do uso de barreiras capilares em sistemas de cobertura incluem sua expectativa de longevidade, principalmente porque ela não estará susceptível 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 ela possa armazenar a infiltração esperada devido às precipitações até que a umidade possa ser subsequentemente removida por evapotranspiração.

A principal variável para o 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 que é independente do clima local e de variações sazonais. 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, onde a condutividade hidráulica é maior. Este desvio da frente de umidade irá causar um aumento na umidade na direção da inclinação da camada de solo, que pode resultar em uma ruptura da barreira.

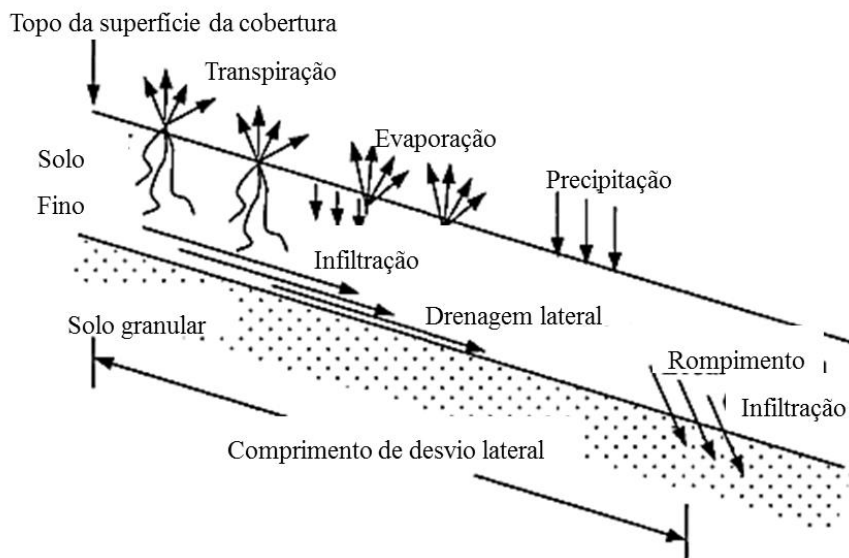


Figura 2.3 - Barreira capilar com camada drenante (modificado - Morris & Stormont, 1997).

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 2.3 (Morris & Stormont 1997). Esta 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.

Segundo Zornberg *et al.* (2010) a compreensão dos conceitos de fluxo de água em solos não saturados tem ganho 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 semi-áridas (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 podem 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 2.4 (Zornberg *et al.* 2009) ilustra os componentes do balanço hídrico. A Figura 2.4(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 2.4(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).

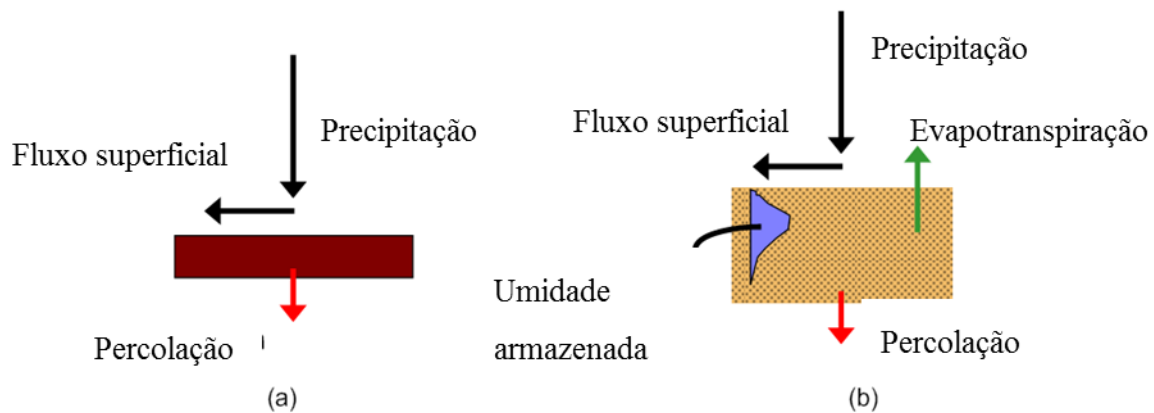


Figura 2.4 - Componentes do balanço hídrico em um sistema de cobertura (a) barreira resistiva (b) barreira evapotranspirativa (modificado - Zornberg *et al.*, 2009)

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 da região ao invés da necessidade de importar solos de outras regiões.

Segundo Zornberg & 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.

Percolação basal é uma importante variável para quantificar o desempenho geral de coberturas de aterros. Ela é o volume de água que existe no limite inferior da cobertura, com o passar do tempo. A água que não pode ser removida da cobertura por evapotranspiração ou drenagem lateral alcança a massa de resíduos armazenados, possivelmente mobilizando contaminantes que podem eventualmente alcançar o lençol freático. Desta forma, um dos objetivos primários de um sistema de cobertura em aterros sanitários é controlar a 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. Desta 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 contato 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 deste 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 a característica hidrofóbica de suas fibras. Desta forma, 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 se mostre como um recurso de preço elevado.

2.3. - ANÁLISE DO 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 necessário 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.

O objetivo da barreira capilar, ou cobertura evapotranspirativa, é minimizar a percolação basal de água, mantendo em níveis previstos em projeto. As quantidades relativas de água e ar no solo, tipicamente quantificadas em volume, influencia consideravelmente o comportamento hidráulico do solo. A Figura 2.5 ilustra alguma das relações mais comuns entre fases do solo, usadas para analisar o processo de fluxo de ar em um solo não saturado.

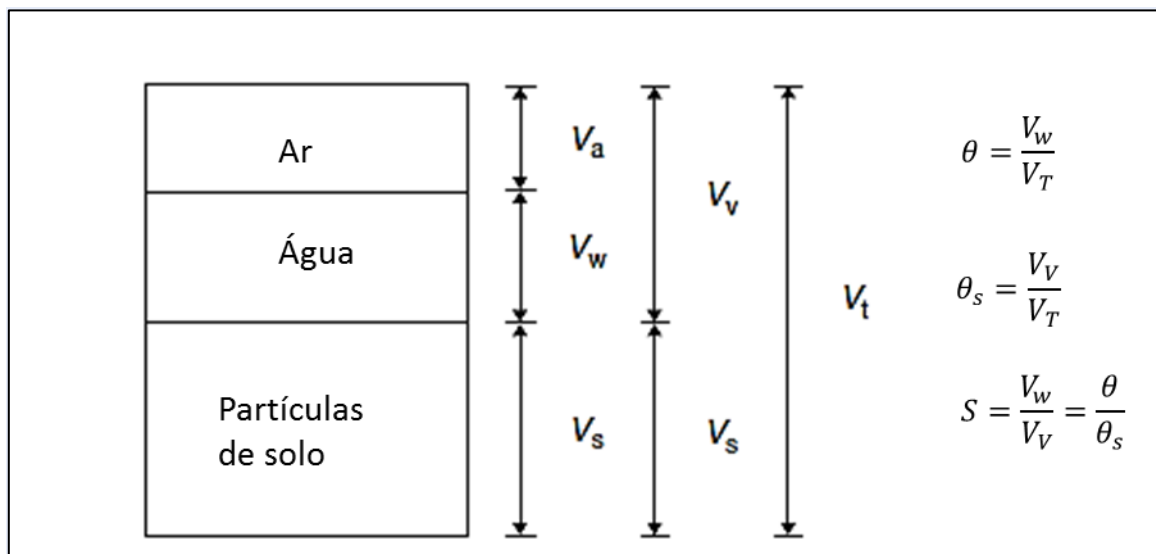


Figura 2.5 - Diagrama volumétrico de fases para solo não saturado (modificado de Zornberg & McCartney, 2007)

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 ($n = \theta_s$). O grau de saturação S é a razão entre a umidade volumétrica e a umidade volumétrica saturada (que corresponde a

porosidade quando o solo está saturado). Finalmente, a quantidade volumétrica de ar presente é a diferença entre a porosidade e a umidade volumétrica (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 and 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, onde 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).

As 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 2.1 (Zornberg & McCartney 2007):

$$\psi = P_a - P_w = h_c \cdot \rho_w \cdot g = \frac{2 \cdot \sigma_{aw} \cdot \cos \gamma}{R} \quad (2.1)$$

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 e γ = o ângulo de contato de molhagem.

Assumindo-se na Equação 2.1 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 a relação entre umidade volumétrica e sucção, conhecido como Curva de Retenção de Água do Solo. A Figura 2.6 mostra as curvas de retenção de água típicas para diferentes materiais geotécnicos. 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 nestas relações é, em parte, causada pela faixa de distribuição de poros destes materiais.

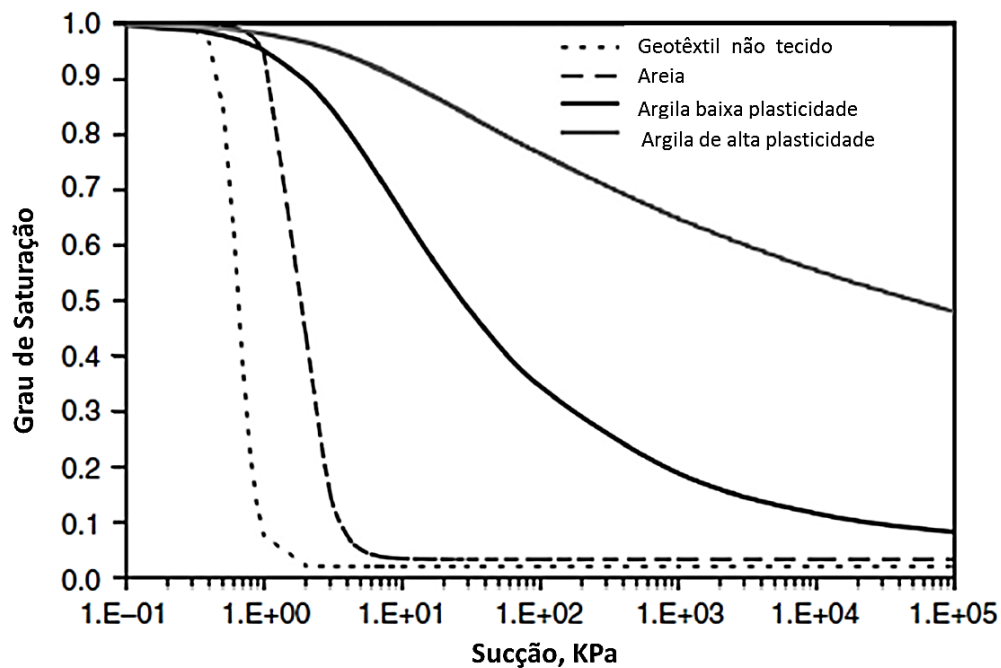


Figura 2.6 - Curvas de retenção de água típicas para diferentes materiais geotécnicos (modificado de Zornberg & McCartney, 2007).

A curva de retenção de água de determinado material não é sensível apenas a 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 este 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 esta sucção é alcançada, a umidade cai da saturação para um valor que permanece aproximadamente constante com o aumento da sucção. Esta condição residual ocorre porque a água se torna oclusa (ou desconectada) dentro dos poros do solo, sem caminhos disponíveis para ocorrer fluxo de água (Zornberg & McCartney, 2007).

Muitas técnicas estão disponíveis para determinar a curva de retenção de água de um geomaterial de forma experimental. Segundo Zornberg & 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 esta técnica é o teste de coluna suspensa (*hanging column test*), ilustrado na Figura 2.7.

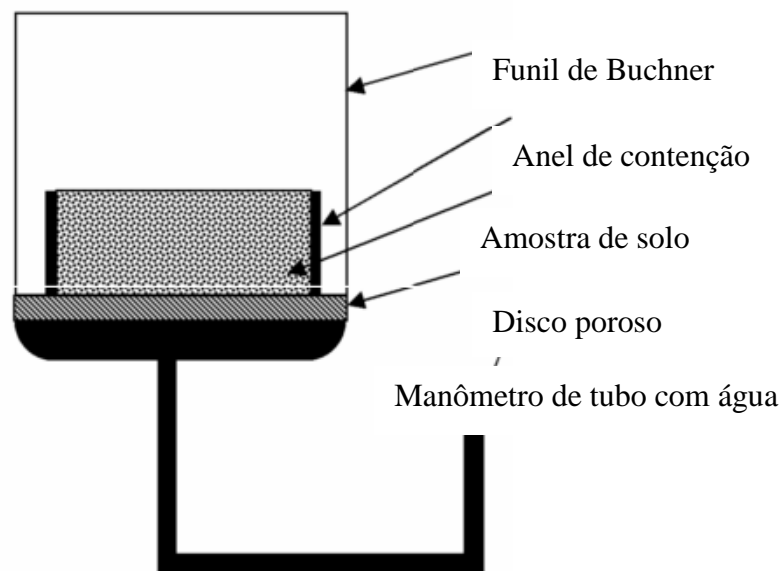


Figura 2.7 - Ensaio de coluna suspensa - teste convencional usado para amostras de solo (modificado de Zornberg et al., 2009).

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

Outra técnica física citada por Zornberg *et al.* (2009) é o ensaio de placa de pressão. A Figura 2.8 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.

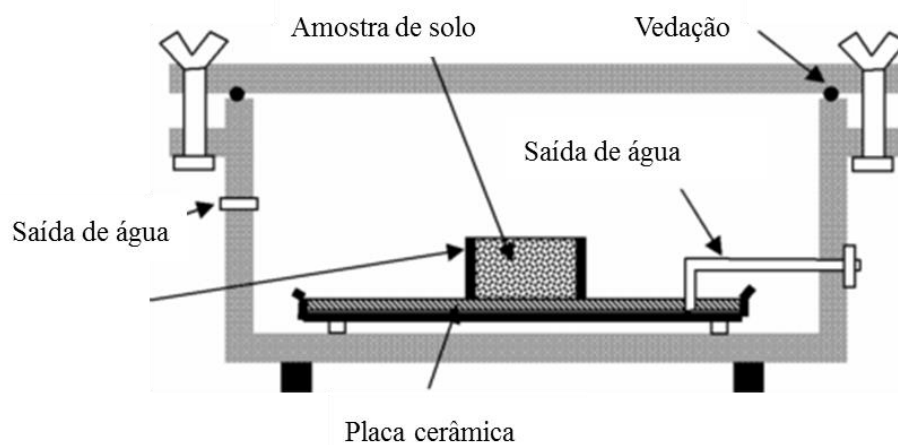


Figura 2.8 - Ensaio de disco de pressão - modo convencional para ensaio de amostras de solo (modificado de Zornberg *et al.*, 2009)

O volume de água que sai da amostra e atravessa o disco cerâmico é medido usando um frasco de Mariotte de carga constante. Este procedimento é repetido sucessivamente com pressões cada vez maiores que gradativamente leva a 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 2.9 ilustra uma técnica termodinâmica convencional para determinar a curva característica em amostra de solo.

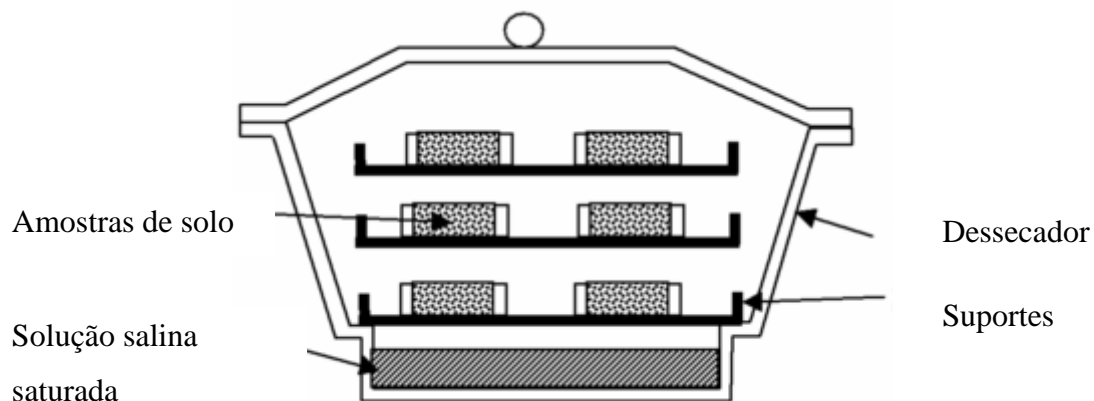


Figura 2.9 - Técnica termodinâmica para determinar curva de retenção de água em solos (modificado de Zornberg et al., 2009).

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 significativa 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 determinação da umidade. Problemas específicos para 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 comumente usados para isto é o proposto por van Genuchten (1980), utilizado em análises numéricas porque é diferenciado 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 2.2:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot [1 + \alpha\psi^N]^{-(1-1/N)} \quad (2.2)$$

Onde θ_r é a umidade volumétrica residual e 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), provê a medida do aumento da impedância contra o fluxo de água com a redução da umidade do meio.

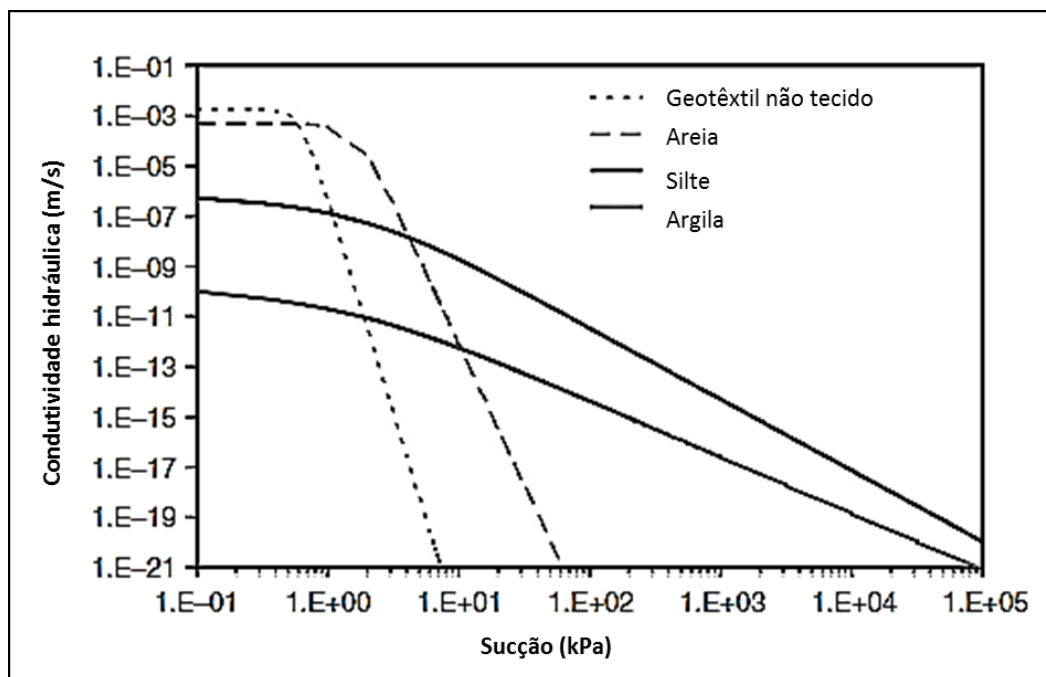


Figura 2.10 - Funções K típicas para diferentes materiais geotécnicos (modificado de Zornberg & McCartney, 2007).

A Figura 2.10 mostra a função da condutividade hidráulica não saturada para diferentes materiais geotécnicos. Próximo da saturação, os materiais granulares (areia e geotêxtil) têm alta condutividade hidráulica, enquanto que 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 a menor condutividade hidráulica não saturada dos materiais selecionados para a cobertura (Zornberg & McCartney, 2006).

Métodos convencionais para 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), e apresentado na Equação 2.3:

$$K(\theta) = K_{sat} \cdot \sqrt{\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}} \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1-N} \right)^{1/(1-N)} \right]^2 \quad (2.3)$$

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 envolvem tipicamente fluxo de água através de amostras confinadas em permeâmetros. Ensaios 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 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 2.11. 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

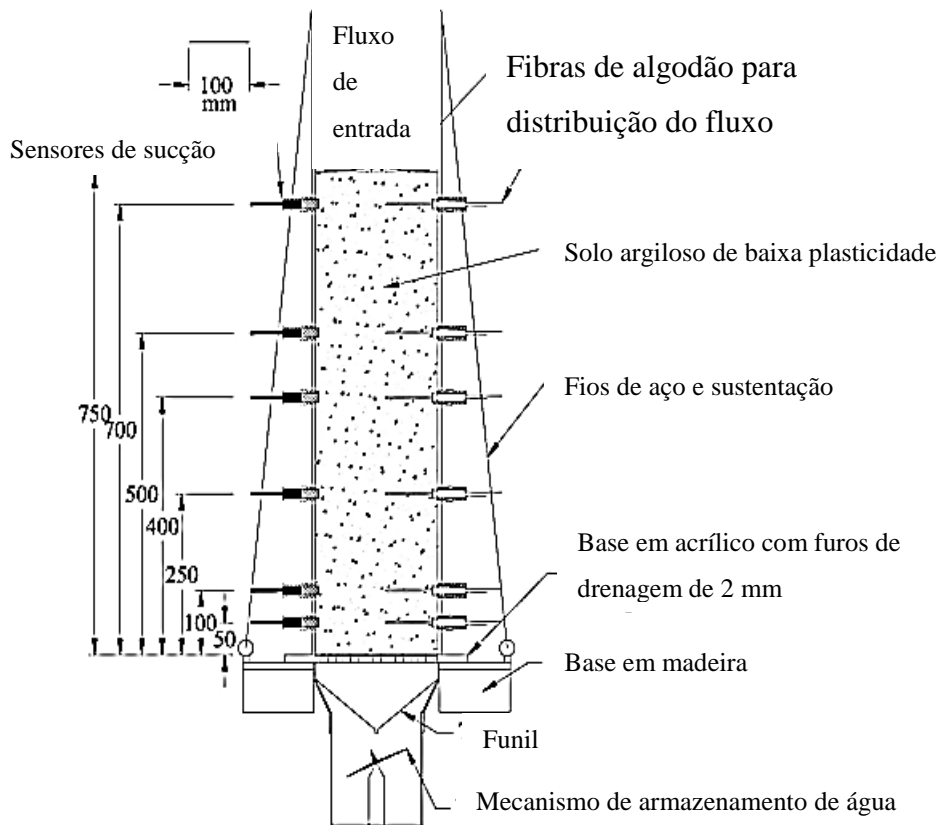


Figura 2.11 - Permeâmetro de coluna instrumentado para determinação da condutividade hidráulica não saturada (modificado de McCartney et al. 2007)

Devido à altura do arranjo, foi necessário instalar vários componentes responsáveis por manter 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 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 a placa de acrílico usando anéis de borracha colocados dentro de ranhuras na base da coluna, para a devida selagem hidráulica. O fluxo de saída foi medido usando 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 TDR (*Time Domain Reflectometer*) 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 2.4:

$$K_i = \frac{\Delta V_{wi}}{A \cdot \Delta t} \left(\frac{-1}{(dh/dz)_i} \right) \quad (2.4)$$

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 2.5:

$$h = z + \frac{u_w}{\gamma_w} \quad (2.5)$$

Onde γ_w é o específico da água e, u_w é a poropressão e z a cota do ponto considerado. Assumindo que a pressão de ar no solo não saturado é zero, e substituindo a sucção ($u_a - u_w$) na Equação 2.5, tem-se a carga hidráulica total expressa pela Equação 2.6:

$$h = z - \frac{\psi}{\gamma_w} \quad (2.6)$$

Onde ψ é sucção mátrica. O gradiente hidráulico utilizado na Equação 2.4 pode ser calculado para cada ponto, como expresso na Equação 2.7:

$$i_i = -1 - \frac{1}{\gamma_w} \left(\frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{z_{i-1} - z_i} \right) \quad (2.7)$$

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 2.8:

$$\Delta V_{w,i}^j = A \sum_{i=1}^n (\theta^j - \theta^{j-1})(z_{i+1} - z_i) \quad (2.8)$$

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

2.4. – ANÁLISE DO COMPORTAMENTO NÃO SATURADO DE GEOTÊXTEIS

A utilização de geotêxtil não tecido em um projeto de barreira capilar exige a investigação do comportamento hidráulico do material. Segundo McCartney *et al.* (2008), dentre as mais importantes características hidráulicas de solos não saturados e geotêxteis não tecidos estão a curva de retenção de água (ou curva característica) e a função da condutividade hidráulica não saturada (Função K).

As condutividades hidráulicas de solos granulares e de geotêxteis não tecidos são menores quando estes estão na condição não saturada do que quando estão saturados. A presença de ar nos poros implica em menos caminhos livres para o fluxo de água (McCartney *et al.*, 2008). Bouazza *et al.* (2006); McCartney *et al.* (2005), McCartney *et al.* (2008), Zornberg *et al.* (2009), entre outros, afirmam que compreensão do comportamento do geotêxtil não tecido na concepção e funcionamento de uma barreira capilar passa, necessariamente, pela definição

das curvas características dos materiais utilizados (solos ou geossintéticos) e pela determinação da condutividade hidráulica em condições não saturadas.

Bouazza *et al.* (2006) afirmam que a curva característica do geotêxtil é de grande importância para a modelagem do fluxo transiente de água em obras de terra que contenham geotêxteis em condições não saturadas. A curva de secagem, obtida pela drenagem da amostra, inicia com a amostra totalmente saturada, quando a sucção é próxima de zero. Dependendo da natureza do material, uma franja capilar pode ser inicialmente detectada, quando a umidade permanece constante com o aumento da sucção. No valor correspondente a entrada de ar (Ψ_{aev}), correspondente a sucção onde a drenagem do material começa, ar entra nos poros externos de maior diâmetro. A partir deste ponto, a umidade decresce rapidamente com o aumento da sucção até alcançar a umidade volumétrica residual.

Stormont *et al.* (1997) demonstram que ocorre histerese na curva característica entre o mecanismo de secagem e o de molhagem. Segundo estes autores, a umidade de alguns tipos de geotêxteis não tecidos não diminui durante a parte inicial do ramo de secagem da curva característica, indicando que, uma vez saturados, alguns geotêxteis podem permanecer neste estado com valores pequenos de sucção.

A Figura 2.12 modificada de Bouazza *et al.* (2006) ilustra a histerese entre as curvas de molhagem e de secagem.

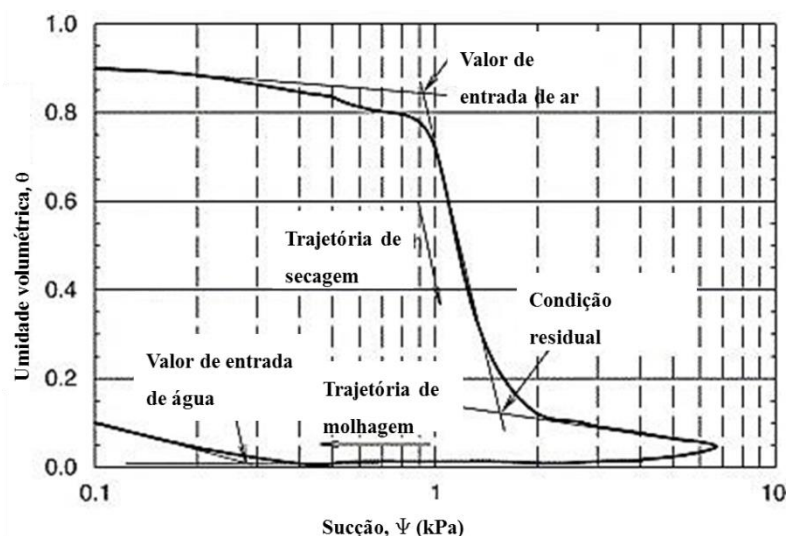


Figura 2.12 - Curva característica de um geotêxtil não tecido (modificado de Bouazza et al., 2006)

O valor de entrada de ar, Ψ_{aev} , é apresentado na figura. A partir do valor de entrada de ar, a quantidade de água na amostra reduz rapidamente com o aumento da sucção até o valor de umidade volumétrica residual ser alcançado.

A Figura 2.12 ilustra ainda o afirmado por Zornberg *et al.* (2010) que a curva de retenção de água pode mostrar significativa diferença entre as trajetórias de secagem e molhagem (histerese).

O valor de umidade volumétrica para um geotêxtil pode ser calculada pela Equação 2.9, a mesma usada para solos em geral:

$$\theta = S \cdot n \quad (2.9)$$

Onde S é o grau de saturação e n é a porosidade do material. A porosidade (n) do geotêxtil e o grau de saturação (S) podem ser calculados usando as equações 2.10 e 2.11 (Koerner, 1998 apud Bouazza *et al.*, 2006):

$$n = 1 - \left(\frac{M_A}{t \cdot \rho_f} \right) \quad (2.10)$$

$$S = \frac{w \cdot M_A}{t \cdot n \cdot \rho_w} \quad (2.11)$$

Onde M_A é a massa por unidade de área, ρ_f é a densidade da fibra do geotêxtil, t é a espessura do geotêxtil, w é a umidade e ρ_w é a densidade da água.

De forma geral, avaliar a capacidade de retenção de água do material, definindo sua curva característica, é mais fácil que a mensuração de sua condutividade hidráulica não saturada. Por esta razão, a prática comum da engenharia tem sido utilizar parâmetros obtidos a partir do formato da curva característica para calcular a condutividade hidráulica não saturada do material. Bouazza *et al.* (2006) apresentam a função de van Genuchten (1980) para a forma da curva característica, dada pela Equação 2.12:

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot \psi^n)]^{(1 - \frac{1}{n})}} \quad (2.12)$$

Onde θ_r e θ_s são o teor de umidade residual e o teor de umidade saturado, respectivamente, ψ é a carga de pressão ou sucção, e α e n são constantes empíricas determinadas por regressão não linear.

A Figura 2.13 ilustra o equipamento proposto por Stormont *et al.* (1997) para realização do ensaio de coluna suspensa (Hanging Column Test) que é utilizado para obter a curva característica de um geotêxtil. O mesmo equipamento foi utilizado por Bouazza *et al.* (2006).

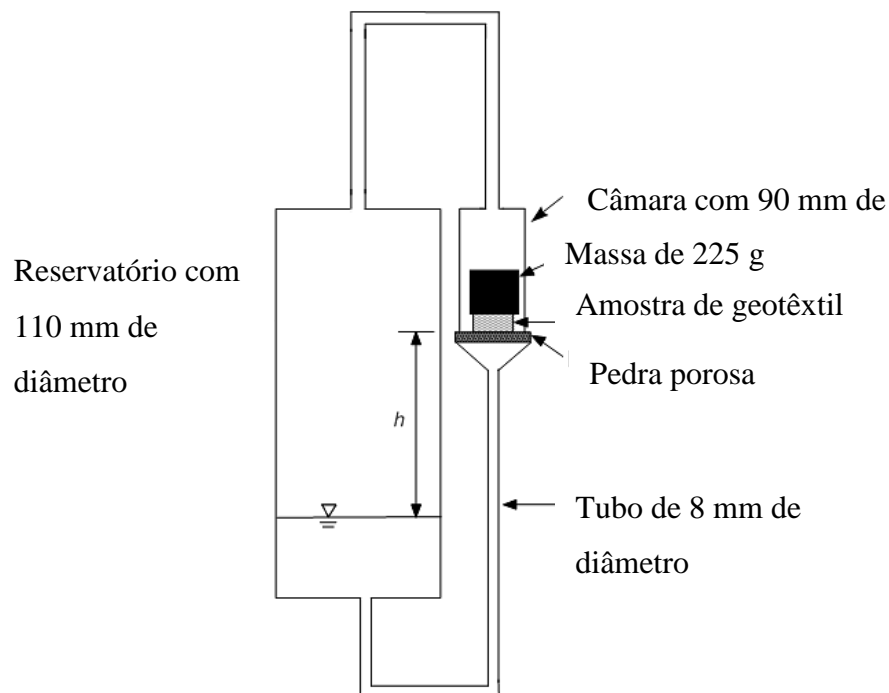


Figura 2.13 - Equipamento para obter a curva característica de amostras de geotêxtil (modificado de Stormont *et al.* 1997).

Bouazza *et al.* (2006) propõem a equação analítica fechada de van Genuchten (1980), apresentada na Equação 2.13:

$$k(\psi) = \psi k_s \frac{[1 - (\alpha \psi)^{n-1} [1 + (\alpha \psi)^n]^{-m}]^2}{[1 + (\alpha \psi)^n]^{m/2}} \quad (2.13)$$

Onde $m = 1 - 1/n$ ou $1 - 1/2n$ e k_s é a condutividade hidráulica não-saturada.

Zornberg *et al.* (2009) propõem uma função da condutividade hidráulica não saturada baseada nas informações obtidas usando os parâmetros do modelo de van Genuchten-Mualem (1980), na Equação 2.14:

$$k(\theta) = k_s \sqrt{\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}} \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1-n} \right]^2 \quad (2.14)$$

Em estruturas de solo com a presença de geotêxtil o comportamento do geotêxtil imerso em um meio com presença de fluxo, estando este meio saturado ou não, pode estar relacionado à estrutura dos poros do geotêxtil. Por seu próprio processo de fabricação, amostras de geotêxtil não tecido não têm a medida dos seus poros uniforme, uma vez que, durante sua fabricação, as fibras são dispostas por processo aleatório. Isto considerado é importante determinar qual a ocorrência de poros de diversas dimensões no corpo do geotêxtil. Esta medida é estimada a partir da definição da curva de distribuição de poros do material, que apresenta a frequência com que ocorre cada medida de poro.

McCartney *et al.* (2005) apresentam um estudo sobre o comportamento de camadas de geossintéticos com função drenante, quando em contato com solos não saturados. Em seu estudo os autores utilizaram um geocomposto drenante que consistia em um geodreno envolto por duas camadas de geotêxtil não tecido, sendo uma em cada plano de sua superfície. Este tipo de elemento, uma combinação de geossintéticos, tem o objetivo de prover a função de ser um filtro, ao mesmo tempo um dreno com alta condutividade hidráulica, podendo também constituir uma camada de separação e proteção, dependendo da aplicação.

Uma vez que o fluxo de água em um geocomposto é razoavelmente bem definido quando o meio onde ele está instalado está saturado, o geocomposto frequentemente será utilizado em uma situação onde a camada de solo que está colocada sobre ele se encontra não saturada. No caso de uma cobertura de aterro em uma região árida ou semi-árida, ou em épocas de regime de chuvas menos frequentes, o sistema formado entre o solo de cobertura e o geocomposto funcionam, na maior parte do tempo, em regime de fluxo não saturado.

Segundo McCartney *et al.* (2005) considerando que a camada de solo disposta sobre o geocomposto em um sistema de cobertura frequentemente está em condição não saturada, uma quebra capilar (*capillary break*) pode se desenvolver na interface entre o solo e o geocomposto, resultando no fenômeno da barreira capilar.

Para 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*). Os materiais foram dispostos em camadas dentro de tubos cilíndricos de acrílico com 20,32 cm de diâmetro. A Figura 2.14 mostra, esquematicamente, dois dos perfis usados nos ensaios.

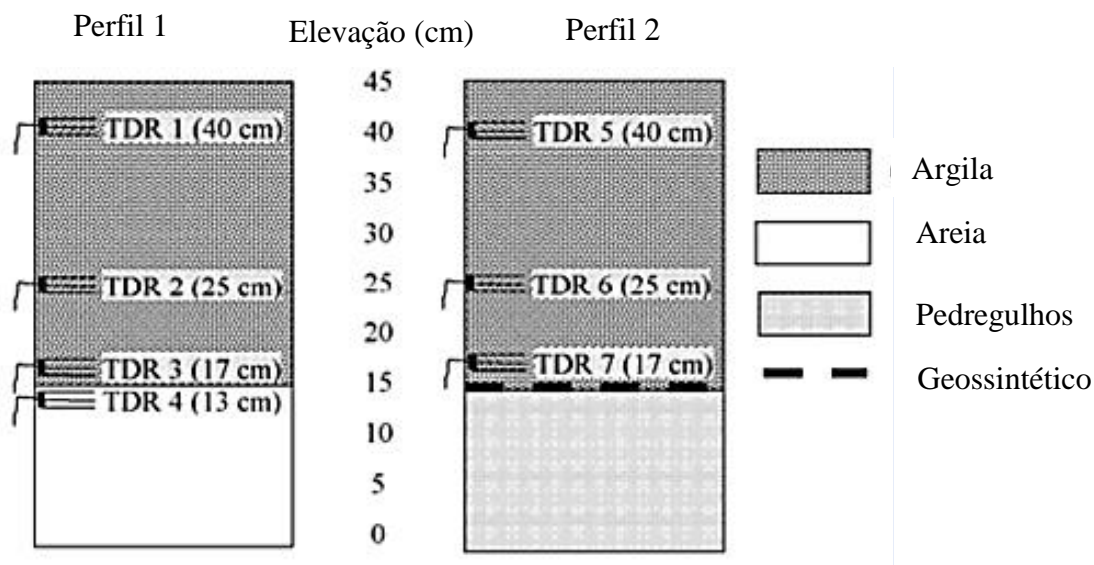


Figura 2.14 - Esquema de perfil de solos em ensaio de coluna média (modificado de McCartney *et al.* 2005)

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 a importante conclusão de que, em um sistema de cobertura não saturada, uma camada de geossintético não drenante em contato com um solo não saturado se comporta de forma similar a uma camada drenante de areia convencional, desenvolvendo uma quebra capilar que resulta na formação de uma barreira ao fluxo e acumulação 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.

McCartney & Zornberg (2007b) realizaram testes em coluna com perfis de solo combinados com camada de geodreno, para analisar o efeito de ciclos de molhagem e secagem sobre a formação de barreira capilar na interface entre a camada de argila compactada e a camada de geossintético. O objetivo do estudo era reproduzir em laboratório as condições de campo de uma cobertura evapotranspirativa projetada como um sistema de cobertura por barreira capilar que foi utilizada na recuperação de uma área degradada, por ser uma antiga área de disposição de resíduos das indústrias química e bélica, pertencentes ao exército americano. Esta área é conhecida como Rocky Mountain Arsenal (RMA) e fica próximo à cidade de Denver, no Colorado, USA. O aterro localizado na área de Rocky Mountain Arsenal consiste em uma camada monolítica de argila de baixa plasticidade com espessura de 1,27 metros. Abaixo da camada de solo foi instalada uma geomembrana com declive de 3% a fim de coletar a água de chuva.

Para investigar o comportamento do perfil formado por solo e geossintético, McCartney & Zornberg (2007b) realizaram ensaios de infiltração com monitoramento de sucção e umidade ao longo do perfil de solo. As colunas eram feitas de tubos de PVC transparentes montados com um anel selador de borracha sobre um disco de acrílico perfurado, e o conjunto foi instalado apoiado em uma plataforma de madeira. Cabos tensionados foram utilizados para manter a estabilidade entre os tubos de PVC e a base de acrílico perfurado.

Como camada superior foi utilizada uma argila de baixa plasticidade (CL) com uma densidade específica de 2,71 e um índice de plasticidade (IP) médio de 12 e um limite líquido (LL) médio de 27, denominado Solo RMA Tipo II (*RMA Soil Type II*). A camada de solo estava superposta a uma camada de geocomposto com espessura de 2,54 mm, uma massa por unidade de área de 200 g/m² e uma densidade das fibras de 910 kg/m³. A porosidade do geotêxtil não tecido foi calculada em 0,913.

A Figura 2.15 a seguir apresenta o esquema utilizado para a realização do ensaio com o perfil A. Foram instalados sensores TDR para monitoramento do avanço da frente de umidade e sensores de tensão para monitoramento do perfil de sucção.

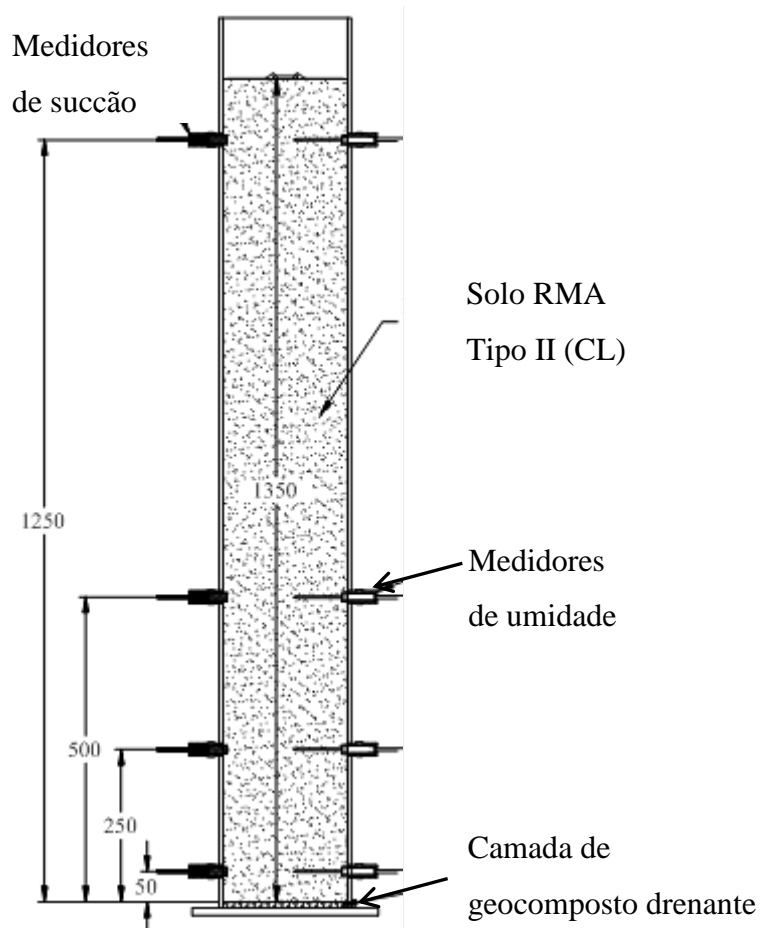


Figura 2.15 - Esquema de ensaio com perfil de solo com 1250 mm de espessura (modificado de McCartney & Zornberg, 2007b).

Os resultados obtidos por McCartney & Zornberg (2007b) para o ensaio do perfil composto por uma cobertura monolítica de argila de baixa plasticidade superposta a uma camada de

geocomposto drenante indicou que há um intervalo considerável de tempo entre o momento que os sensores detectam a chegada da frente de molhagem no fundo do perfil, e quando ocorre a detecção de vazamento de água além do geocomposto. Este intervalo de tempo foi superior a 400 horas. O comportamento observado indicou que, uma vez que a frente de molhagem alcançou a extremidade inferior do perfil, houve uma retenção de umidade devido a diferença de condutividade hidráulica entre o solo e o geocomposto.

O comportamento observado é típico de uma barreira capilar, onde a frente de molhagem só rompe a camada de solo granular, ou, neste caso de geossintético, depois que o sistema alcança a valor de entrada de ar e as condutividades hidráulicas do solo e do geossintético alcançaram o mesmo valor. Este resultado indica a eficiência do geossintético em substituição a uma camada de solo granular em um projeto de barreira capilar.

O comportamento hidráulico de um geossintético, e especificamente no caso de geotêxteis não tecidos, pode ter relação com a dimensão dos poros presentes em sua estrutura. Os diferentes tamanhos de poros em um geotêxtil não tecido podem atuar tanto como caminhos de fluxo para a água presente no material como espaços de retenção de água, dependendo do valor de sucção que atue no material. A curva de distribuição de poros de um geotêxtil estima com que frequência ocorre diferentes diâmetros de aberturas na estrutura do material.

Apesar da importância da curva de distribuição de poros para a compreensão do comportamento hidráulico do geotêxtil, esta é uma propriedade difícil de ser determinada. Bhatia & Smith (1996) citam algumas técnicas utilizadas para a determinação da distribuição de poros em um geotêxtil. Métodos indiretos, como peneiramento seco, peneiramento dinâmico, e peneiramento úmido tentam determinar a curva de distribuição de poros de um geotêxtil pela passagem de certa quantidade de microesferas padrão, de diferentes dimensões, através do tecido. Estas técnicas são semelhantes às usadas em solo para determinação da curva granulométrica. Mas ao invés de utilizar um jogo de peneiras com diferentes aberturas, utiliza-se a amostra de geotêxtil como uma peneira e microesferas de diferentes diâmetros.

Métodos de medição direta como análise de imagem, porosimetria por intrusão de mercúrio e modelos matemáticos tentam calcular a curva de distribuição e poros via medição direta da

ocorrência de cada poro, ou por uma estimativa estatística a partir da contagem de poros de uma amostra (Bathia & Smith, 1994, Aydilek *et al.*, 2005).

Dentre as diversas metodologias propostas para a determinação da curva de distribuição de tamanhos de poros em geotêxteis, a norma ASTM 6767-11 propõe o Método Normalizado para a Característica de Tamanhos de Poros de Geotêxteis pelo Teste de Fluxo Capilar (*Standard Method for Pore Size Characteristics of Geotextiles by Capillary Flow Test*), também conhecido como Teste do Ponto de Bolha (*Bubble Point Test*). O ensaio regulamentado pela ASTM 6767-11 propõe a determinação dos tamanhos dos poros de uma amostra de geossintético na margem entre 0,001 mm e 0,5 mm, sendo que a norma afirma que a acurácia do método é maior no intervalo entre 0,001 mm e 0,2 mm. O teste é realizado tanto com a amostra molhada (saturada) quanto com a amostra seca. Para fins de cálculo os poros são considerados esféricos.

O método do ponto de bolha é baseado no princípio do fluxo capilar, que afirma que um material poroso apenas permitirá a passagem de um líquido quando a pressão aplicada exceder a atração capilar exercida pelo poro sobre o líquido. No teste um material poroso é saturado com um líquido que molhe completamente o material. O líquido usado na saturação deve ser facilmente absorvido dentro de todos os poros do material. O ângulo de contato entre o líquido e os poros do material é zero (líquidos com baixa tensão superficial alcançam mais facilmente esta situação) (Bhatia & Smith, 1996). Quando a amostra é ensaiada molhada, próxima da saturação, quando da aplicação da pressão de ar, os poros de maiores diâmetros tendem a ser esvaziado primeiro. Isto ocorre porque a tensão capilar é inversamente proporcional ao diâmetro do poro.

Dentro do poro preenchido por água, a condição de equilíbrio pode ser expressa pela Equação 2.15 proposta pela ASTM 6767-11:

$$\pi \cdot O_i \cdot T \cdot B \cdot \cos \theta = \frac{(\pi)}{4} \cdot O_i^2 \cdot P \quad 2.15$$

Onde: O_i = diâmetro do poro, T = tensão superficial, P = pressão e B = constante capilar.

O lado esquerdo da Equação 2.15 é a força resistiva desenvolvida a partir da ação da tensão de superfície atuando entre o líquido e a face lateral de um poro ou constrição de diâmetro O . O lado direito da Equação 2.15 é a força motriz desenvolvida, a partir da pressão aplicada multiplicada pela área do poro ou constrição. Resolvendo a Equação 2.15, reescrevendo para determinar o tamanho do poro, tem-se a Equação 2.16:

$$d = \frac{4.T.B.\cos\theta}{P} \quad 2.16$$

Onde: d = diâmetro do poro para a pressão P (mm), T = tensão superficial do líquido de molhagem (N/m), B = constante capilar, (assumido 0,715, conforme norma D 6767).

Quando o líquido molha completamente a amostra, tem-se $\cos\theta = 1$. Assim, a Equação 2.16 pode ser reescrita como mostrado na Equação 2.17:

$$d = \frac{4.B.T}{P} \quad 2.17$$

Substituindo fatores de conversão de pressão e a constante capilar, a norma D 6767-11 propõe a seguinte forma expressa na Equação 2.18:

$$d = \frac{[2860.T(\frac{dynes}{cm})]}{[P(Pa)]} \quad 2.18$$

Comparando a Equação 2.17 com a Equação 2.18, tem-se $4.B = 2860$, logo, $B = 715$. Convertendo as unidades da Equação 2.18 para o Sistema Internacional, tem-se que $B = 0,715$, valor que será usado na Equação 2.17 para o cálculo do diâmetro equivalente em cada nível de pressão. O valor da tensão superficial T é adotado como 72 mN/m (0,072 N/m) considerando a amostra ensaiada em temperatura ambiente de 25 °C (Kaye and Laby, 1973 *apud* Fredlund & Rahardjo, 1993).

A Equação 2.17 relaciona o diâmetro relativo do poro ou constrição para cada valor de pressão utilizado no ensaio. Como se observa, pressões maiores resultam em um valor de poro equivalente menor. O ensaio de ponto de bolha pode ser estendido para medir a completa

distribuição de poros de um material pelo acréscimo continuado da pressão aplicada sobre a amostra permitindo, progressivamente, que poros cada vez menores sejam esvaziados.

A curva de distribuição de poros é obtida comparando o fluxo de ar através da amostra nas condições molhada e seca para o mesmo tamanho de poro. A partir da aplicação de uma pressão na amostra de geotêxtil, é medida a quantidade de ar que passa pela amostra em cada incremento de pressão com a utilização de um rotâmetro ou de um fluxômetro. O gráfico de pressão *versus* fluxo de ar é traçado tanto para a amostra úmida (iniciando o ensaio com a amostra saturada) quanto para a amostra seca. Os valores são plotados em uma escala semi-logarítmica, com o valor da pressão aplicada em escala logarítmica (eixo das abscissas) e o valor do fluxo de ar em escala normal no eixo das ordenadas. A Figura 2.16 mostra um exemplo das curvas úmidas e secas resultantes de um ensaio de ponto de bolha (*Bubble Point Test*).

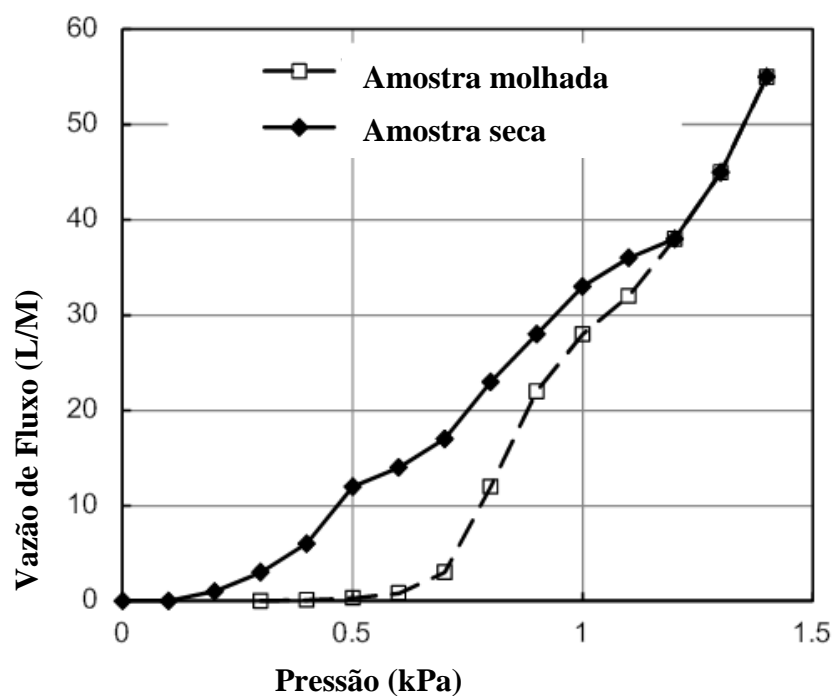


Figura 2.16 - Curvas obtidas em testes de ponto de bolha (modificado de Eun & Tinjium, 2011)

As medidas obtidas pelo gráfico de pressão versus fluxo de ar, obtidas após o ensaio de ponto de bolha, são utilizados para traçar a curva de distribuição de tamanho de poros da amostra. A Equação 2.19 é utilizada para calcular a porcentagem de ocorrência de cada diâmetro

equivalente de poros, a partir das leituras de fluxo de ar através das amostras seca e inicialmente saturada:

$$\%Menor\ que = 1 - \left(\frac{Q_{wet}}{Q_{dry}} \right) * 100 \quad (2.19)$$

Onde: *%Menor que* = porcentagem de ocorrência de poros menores que determinado diâmetro; Q_{wet} = fluxo de ar que passa através da amostra no teste úmido na mesma pressão (L/min); Q_{dry} = fluxo de ar que passa através da amostra no teste seco na mesma pressão (L/min).

A Figura 2.17 ilustra um exemplo de curva de distribuição de poros obtida após aplicação das equações 2.17 e 2.19 para cada valor de pressão, a partir dos ensaios realizados por Eun & Tinjium (2011) para diferentes tipos de geotêxteis não tecidos de polipropileno.

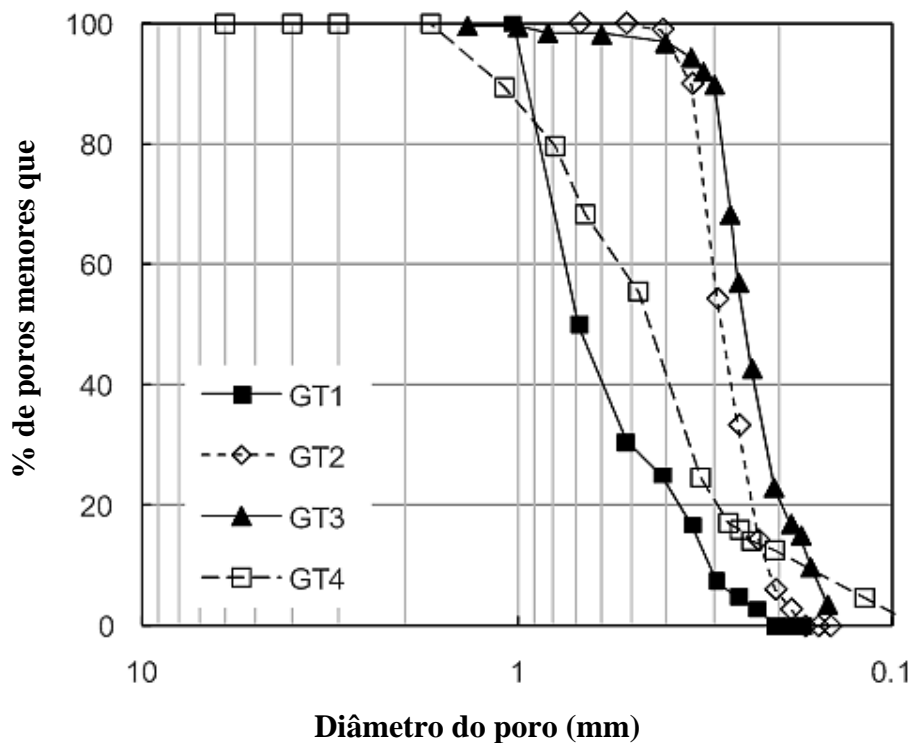


Figura 2.17 - Curvas de distribuição de poros obtidas pelo ensaio de Ponto de Bolha. (modificado de Eun & Tinjium, 2011).

Diversos trabalhos tem ilustrado o uso do ensaio de ponto de bolha para determinação da curva de distribuição de poros de geossintéticos, com o devido sucesso, demonstrando ser um método adequado para esta finalidade. Em seu estudo sobre comportamento filtrante de geossintéticos sujeitos a pressão, Gardoni (2000) utilizou um equipamento com aquisição automática de dados para encontrar a curva de distribuição de poros em geotêxteis não tecidos.

Bathia & Smith (1995) utilizam um equipamento de pressão controlada e registro automático de pressão para medição da curva de distribuição de poros em geossintéticos. Eun & Tinjium (2011) propõem um equipamento mais simples para a execução do ensaio de ponto de bolha, baseados nas orientações da norma ASTM 6767-11, mas sem uma aquisição automática de dados.

No equipamento proposto por Eun & Tinjium (2011), a aplicação de pressão na amostra, bem como as medições de pressão e fluxo de ar através dela, dependem da ação manual do operador e de sua observação dos dados registrados nos leitores de saída. O equipamento proposto por Eun & Tinjium (2011) serviu como base para o desenvolvimento do sistema utilizado neste trabalho para medição da curva de distribuição de poros em geotêxteis não tecidos.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir são apresentados os materiais utilizados nos ensaios de laboratório para compreensão do fenômeno da barreira capilar em coberturas de solo com e sem a presença de geossintéticos.

3.1 – MATERIAIS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

A campanha de ensaios realizada durante os estudos realizados nesta tese tiveram como objetivo compreender a ocorrência do fenômeno da barreira capilar em perfis de solo com a presença de geotêxteis não tecidos.

Para a melhor compreensão do fenômeno, foram realizados ensaios de infiltração em colunas de solo, tanto utilizando colunas de médio porte quanto colunas altas, com o monitoramento da infiltração de água e a variação de umidade e sucção. Algumas colunas foram ensaiadas com a presença de geotêxteis não tecidos e outras ensaiadas sem a presença deste material, seja para compreender o comportamento hidráulico dos materiais ensaiados, seja para comparar a diferença de desempenho dos sistemas com e sem a presença do geotêxtil não tecido. Além dos ensaios de coluna, foram realizados ensaios de coluna suspensa e ensaio de ponto de bolha para determinação das características hidráulicas e físicas dos geotêxteis não tecidos utilizados na pesquisa. A seguir algumas características e informações sobre os materiais utilizados nos ensaios são apresentadas.

Os ensaios de infiltração em colunas foram executados no Laboratório de Geotecnia da Universidade do Texas em Austin, no Texas, USA. Na execução dos ensaios utilizaram-se metodologias e equipamentos já utilizados pelo grupo de Geotecnia da UT-Austin em pesquisas similares. Para realização dos ensaios de infiltração foram utilizados solos finos e granulares, além de pedregulhos, existentes no laboratório da UT-Austin e com suas características geotécnicas já conhecidas. Como material geossintético foram utilizadas amostras de geotêxtil não tecido enviados do Brasil, da Universidade de Brasília.

3.1.1 – SOLOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE COLUNA

Para a realização dos ensaios foram utilizados cilindros em acrílico, com diâmetro interno de 197 mm, e dentro destes cilindros foram compactados perfis de solos combinados que simulavam coberturas finais de depósitos de resíduos sólidos. Para montagem dos perfis de solos em cada teste foi utilizado um solo disponível no laboratório e utilizado em outras pesquisas, conhecido como *Rock Mountain Arsenal Soil Type II* (Solo RMA Tipo II). Foi utilizada ainda a areia *Monterey* nº30 como camada granular para simulação de barreira capilar em colunas de solo. Para alguns ensaios utilizando solo e geossintéticos foram utilizados pedregulhos (brita) como camada de suporte, por sua alta capacidade drenante. A Figura 3.1 mostra o aspecto visual da areia *Monterey* nº 30 e do solo RMA Tipo 2, dentro de recipientes de vidro.



Figura 3.1 - Amostras de areia Monterey nº30 e de solo RMA Tipo 2 em recipientes de vidro no laboratório de Geotecnia da UT-Austin.

O solo RMA Tipo II foi classificado como uma argila de baixa plasticidade (CL pela Classificação Unificada de Solos). Este 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. Esta 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.

A UT-Austin esteve envolvida no processo de projeto e monitoramento da cobertura evapotranspirativa executada como cobertura final, e este solo foi intensivamente analisado por McCartney (2007) em sua tese de doutorado na Universidade do Texas, em Austin. Outros pesquisadores do grupo de Geotecnia da UT-Austin igualmente utilizaram este solo em suas pesquisas, realizando tanto sua caracterização geotécnica quando avaliando seu comportamento hidráulico.

A curva granulométrica obtida por McCartney (2007) para este material foi determinada utilizando peneiras e ensaios de sedimentação. O solo tem aproximadamente 60% passando na peneira 200. A Figura 3.2 apresenta a curva granulométrica para o solo RMA Tipo II:

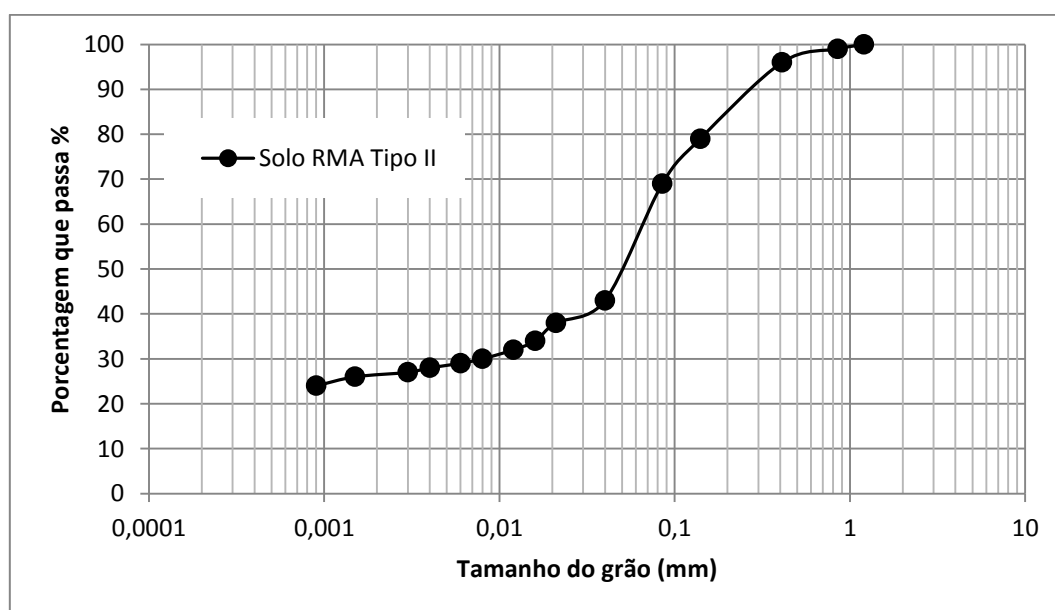


Figura 3.2 - Curva granulométrica Solo RMA Tipo II (modificado de McCartney,2007)

A densidade específica dos grãos (G_s) do solo RMA Tipo II foi determinada como 2,71, usando 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 D4318-10. O solo tem um limite de liquidez de 29% e um índice de plasticidade (IP) de 17%.

Para a determinação da condutividade hidráulica saturada K_s do solo RMA Tipo 2 McCartney(2007) utilizou a técnica do permeâmetro de parede flexível, encontrando o valor da condutividade hidráulica do solo para diferentes umidades de compactação. As amostras compactadas ensaiadas eram cilíndricas, com 14,22 cm de altura e 7,11 cm de diâmetro, saturadas por contrapressão (*back-pressure*) em um permeâmetro de parede flexível com tensão confinante de 14 kPa. A baixa tensão efetiva foi utilizada para representar as condições de um elemento de solo superficial.

Para a determinação dos valores de condutividade hidráulica, McCartney (2007) compactou as amostras de solo RMA Tipo II utilizando a energia do ensaio de Proctor normal, variando as umidades de compactação entre 8% e 16,5%. Para uma umidade ótima de 11,7% e uma compactação relativa de 70% do valor de Proctor Normal (1902 kg/m³) o valor da condutividade hidráulica saturada foi igual a $6,6 \cdot 10^{-6}$ m/s. Como resultado do ensaio obteve-se ainda a curva de regressão linear relacionando a condutividade hidráulica saturada (K_s) e a umidade gravimétrica de compactação (w_c), dada por:

$$K_s = 2,0 * 10^{-5} * e^{-0,65.w_c} \quad 5.1$$

McCartney (2007) utilizou diferentes valores de porosidade na compactação do solo RMA Tipo II, em diferentes densidades, para investigar os efeitos da densidade nas características hidráulicas do solo. As amostras foram compactados na densidade correspondente a 70%, 80% e 90% da densidade seca máxima, com porosidades de 0,50, 0,45 e 0,35, respectivamente. Na compactação dos corpos de prova para realização dos ensaios de infiltração em colunas pequenas, foi utilizado 80% da densidade seca máxima obtida no ensaio Proctor Normal, resultando em uma porosidade de 0,45 para a coluna de solo.

A Figura 3.3 apresenta a estimativa de uma curva de retenção de água do solo RMA Tipo II, obtida pelos métodos da coluna suspensa (*hanging column test*) e placa de pressão (*pressure plate*). A curva de retenção de água indica que a argila tem uma porosidade de 49,2%, um valor de entrada de ar de 1 kPa e uma umidade residual de aproximadamente 5%.

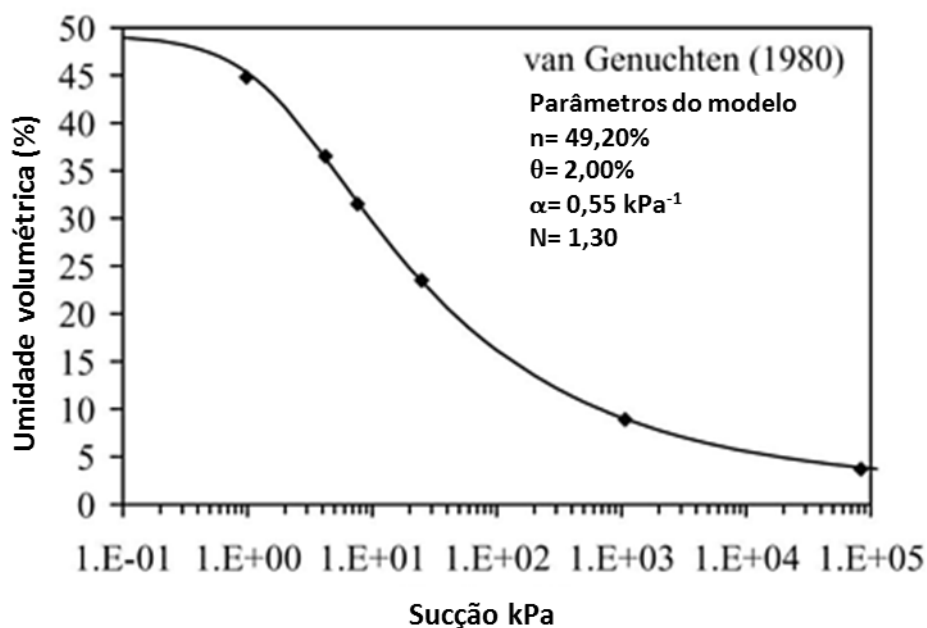


Figura 3.3 - Curva de retenção de água para solo RMA Tipo II (modificado de McCartney, 2007b).

Para alguns ensaios em coluna, como camada drenante ou como camada granular em um arranjo de barreira capilar, foi utilizada a areia *Monterey* n°30. Este material granular foi utilizado por já estar disponível no Laboratório de Geotecnia da UT-Austin e por ter sido utilizado em trabalhos anteriores pelo grupo de pesquisa da UT-Austin.

A areia *Monterey* n°30 é uma areia limpa, uniformemente graduada, classificada como SP (areia mal graduada, pedregulhosa, com pouco ou nenhum fino) pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCU). As partículas são arredondadas, consistindo predominantemente de quartzo, com uma pequena quantidade de feldspato e outros minerais. A média do tamanho das partículas deste material é de 0,4 mm, o coeficiente de uniformidade é 1,3 e o coeficiente de curvatura é próximo de 1,1.

A Figura 3.4 apresenta a curva granulométrica da areia *Monterey* n°30. Os índices de vazios máximo e mínimo da areia *Monterey* n°30 são iguais a 0,83 e 0,53, respectivamente. O peso unitário para a areia *Monterey* n°30 nas densidades relativas de 55% e 75% são de 15,64 kN/m³ e 16,21 kN/m³, respectivamente (Zornberg *et al.* 1998). O ângulo de atrito estimado para este material, obtido a partir de ensaio triaxial, são 35° para uma densidade relativa de 55% e 37,5° para uma densidade relativa de 75% (Zornberg *et al.*, 1998). A areia *Monterey*

nº30 apresenta baixo índice de quebra quando testada sob níveis moderados de tensão em ensaios de cisalhamento (Zornberg *et al.*, 2004).

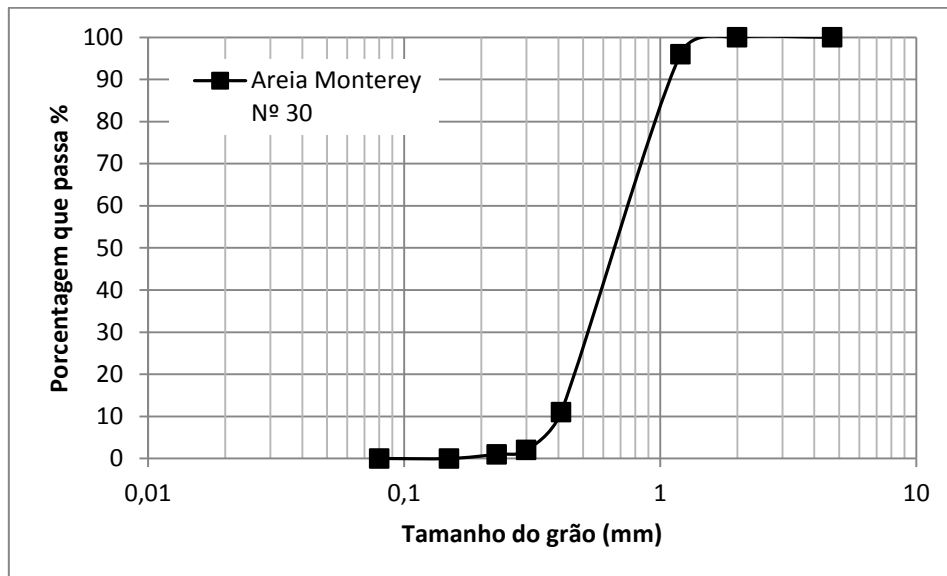


Figura 3.4 - Curva granulométrica da areia Monterey nº30 (modificado de McCartney, 2007).

3.1.2 – GEOTÊXTEIS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

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 este estudo, os geossintéticos utilizados foram geotêxteis não tecidos, agulhados com filamentos de poliéster. Foram utilizados três tipos de geotêxteis, com diferentes massas por unidade de área.

Os geotêxteis não tecidos já estavam disponíveis no laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília, e foram utilizados em estudos anteriores por Gardoni (1995), Gardoni (2000) e Tatto (2010). Os geotêxteis receberam a nomenclatura G1, G2 e G3 de acordo com a massa por unidade de área. A Tabela 5.2 apresenta as principais características dos geotêxteis utilizados. Os valores de d_f (diâmetro da fibra de poliéster) e K_{sat} (condutividade hidráulica saturada) foram obtidos de Gardoni (2010) e Gardoni (1995), respectivamente.

Tabela 3.1 - Características físicas dos geotêxteis não tecidos utilizados (modificado de Gardoni (2010) e Gardoni (1995).

Nomenclatura	Gramatura (g/m²)	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

3.2 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS

No laboratório de Geotecnia e Geossintéticos da Universidade do Texas foram realizados ensaios para determinar o comportamento hidráulico não saturado e a curva de distribuição de poros (ou restrições) dos geotêxteis não tecidos utilizados na pesquisa. Foi ainda realizada uma série de ensaios em colunas de pequeno porte para determinação do comportamento hidráulico não saturado de diferentes perfis de cobertura compostos de solo e geossintéticos.

No laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília foi realizada uma série de ensaios para a determinação da curva de distribuição de poros de geotêxteis não tecidos. O equipamento utilizado para este fim foi montado de acordo com a experiência tecnológica adquirida durante o período de doutorado sanduíche na Universidade do Texas.

3.2.1 – EQUIPAMENTOS PARA ENSAIOS DE PERFIL DE SOLO EM ENSAIOS DE COLUNA DE PEQUENO PORTE

Uma forma de entender o comportamento do fluxo em meio não saturado é a realização de ensaios de infiltração utilizando colunas de solo. Nestes ensaios o solo é colocado não saturado e é imposto um fluxo de água através da amostra. Sensores de umidades e sucção registram o comportamento do solo quando submetido à variação de umidade e tensão

Kuhn & Zornberg (2006) e McCartney (2007) realizaram ensaios em colunas de solo para o entendimento do comportamento hidráulico não saturado de perfis, utilizando o solo

compactado. Utilizaram uma camada drenante composta de pedregulhos e geossintéticos. Ensaio de infiltração em colunas de solo é uma forma prática de compreender o comportamento hidráulico não saturado de diferentes solos com diferentes configurações, desde que devidamente instrumentadas com sensores para medidas de umidade e sucção.

Foi realizada uma série de ensaios em colunas de pequeno porte com diferentes configurações de perfis. Para o molde dos perfis de solo foram utilizadas colunas de acrílico transparente de pequeno porte, com um diâmetro interno de aproximadamente 19,7 cm e altura total de cerca de 30 cm. Os solos utilizados nos ensaios eram compactados diretamente no cilindro de acrílico, utilizando-se um pilão de compactação.

Para a montagem de perfis de solo e geotêxteis, era executada uma camada de pedregulho como suporte para o sistema solo-geotêxtil. Esta camada de pedregulho, por ter alta condutividade hidráulica, tinha a função tanto de prover suporte para o geotêxtil não tecido como para funcionar como uma camada de livre drenagem, permitindo que a água que atravessasse a camada de geotêxtil pudesse se mover livremente, não permitindo o acúmulo desnecessário de umidade e fazendo com que o sistema funcionasse de tal forma que o efeito de barreira capilar fosse observado entre o solo e o geotêxtil, sem a interferência da camada de suporte.

A Figura 3.5 apresenta a camada drenante de pedregulho e o geotêxtil instalados no ensaio de infiltração em coluna.

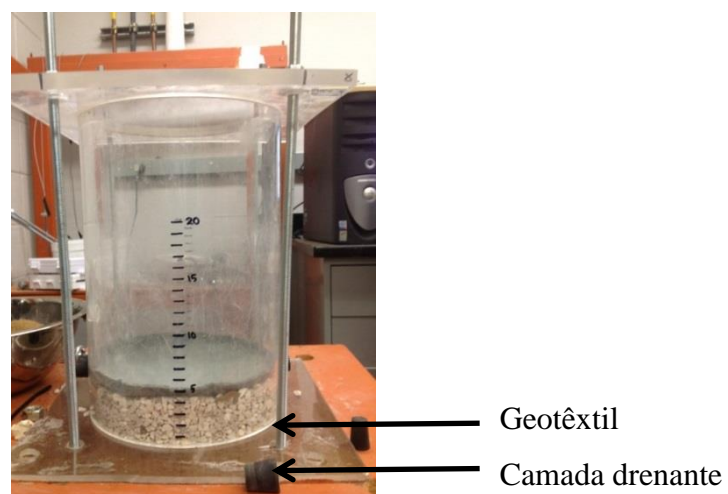


Figura 3.5 - Execução de camada de pedregulhos com função drenante e de suporte ao geotêxtil não tecido.

O diâmetro da amostra de geotêxtil é um pouco maior que o diâmetro interno do cilindro de acrílico, de forma que, uma vez compactadas as camadas de solo acima do geotêxtil, não ocorra fluxo preferencial junto à parede interna do cilindro de acrílico.

Após a instalação do geotêxtil, dava-se início a execução do perfil de solo RMA Tipo 2. A execução do perfil de solo foi feita em camadas com espessura média de 3 cm. A maior parte dos perfis de solo foram executados ao menos com 5 camadas compactadas, com uma espessura final de 15 cm. Ao final da compactação de uma camada de solo a superfície era escarificada para proporcionar melhor continuidade entre as camadas compactadas, resultando em um perfil mais homogêneo e evitando a descontinuidade hidráulica entre as camadas de solo.

A Figura 3.6 ilustra como era executada uma camada de solo quando eram instalados sensores de umidade e sucção.

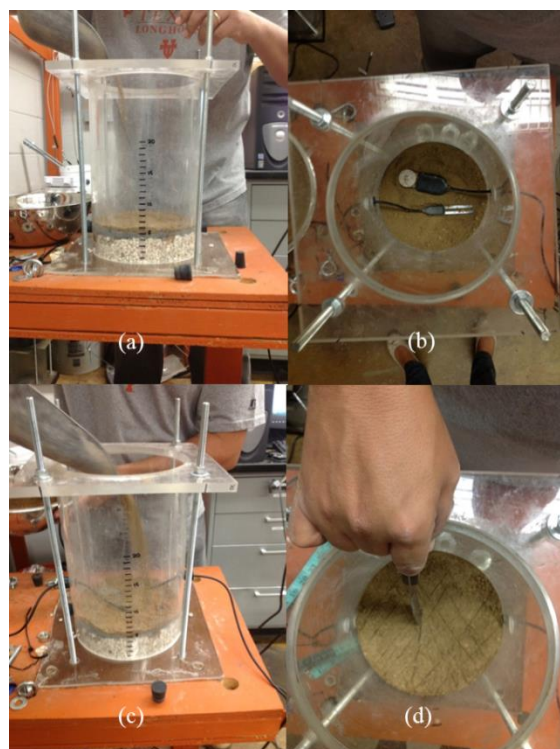


Figura 3.6 - Sequência demonstrando a execução de uma camada de solo compactada com a presença de sensores de umidade e pressão: (a) colocação de solo sobre a camada de geotêxtil, (b) posicionamento dos sensores, (c) cobertura dos sensores com solo solto e (d) escarificação da superfície da camada compactada.

Para leituras de umidade e sucção durante a realização dos ensaios de coluna de pequeno porte, foram utilizados sensores já disponíveis no Laboratório de Geotecnia da Universidade do Texas, em Austin, de fabricação da empresa Decagon Devices.

Como sensor de umidade foi utilizado o sensor ECH₂O EC-5, também da Decagon Devices. O sensor EC-5 é um sensor de baixo custo que determina a umidade volumétrica do meio a partir da medição da constante dielétrica do solo e equações de calibração próprias. As dimensões do sensor de umidade ECH₂EC-5, informadas pelo fabricante, são de 8,9cm de comprimento, 1,8 cm de largura e 0,7 cm de espessura. A Figura 3.7 ilustra o sensor de umidade em detalhe.



Figura 3.7 - Detalhe do sensor de umidade ECH₂O EC-5 (Fonte: www.decagon.com)

Para cálculo da umidade volumétrica em solos, o fabricante fornece uma equação de calibração que relaciona, linearmente, dados puros em mV (milivolts) com a umidade volumétrica do solo. A Equação 3.1 mostra a equação de calibração proposta pelo fabricante:

$$\theta = 8,50 * 10^{-4} * Raw - 0,48 \quad (3.1)$$

Onde *Raw* é a leitura de saída do datalogger Decagon, utilizado para registro das leituras. Segundo Azevedo (2012) a principal vantagem do sensor ECH₂O EC5 é que são do tipo *plug-and-play* e são mais baratos que os tradicionais sensores TDR (*Time Domain Reflectometer*). Até 5 sensores podem ser conectados simultaneamente ao datalogger Decagon Em50, responsável pela coleta dos dados destes sensores. Azevedo (2012) empregou os sensores ECH₂O EC5 em seus ensaios de colunas de solo. A Figura 3.8 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.



Figura 3.8- Recipiente de proteção do datalogger e detalhe do equipamento aberto com as conexões para os sensores (Fonte: www.decagon.com)

Azevedo (2012) procedeu a uma calibração dos sensores ECH₂O EC-5 para as condições específicas do solo utilizado em seus ensaios de coluna. Ao invés de inserir o sensor em um solo previamente compactado, o procedimento de calibração envolveu a compactação do sensor dentro da camada de solo, sendo que o sensor foi posicionado horizontalmente e paralelo ao plano da superfície compactada.

Azevedo (2012) conduziu testes de calibração dos sensores ECH₂O EC-5 utilizando um intervalo de umidade variando de 0,10 a 0,46, em uma camada de solo compactada com 4 cm de espessura, compactada com diferentes umidades. Para o solo com alto teor de umidade, acima de 35% o procedimento de compactação foi diferente, o solo foi compactado com

umidade de 15% e foi se adicionando uma quantidade pré-determinada de água por infiltração, utilizando bomba peristáltica, até se atingir a umidade alvo. O fluxo foi distribuído no topo da camada utilizando uma folha de papel filtro, sem perfuração, a exemplo do que foi realizado para infiltração nos ensaios de coluna. A Figura 3.9 apresenta a melhor curva de calibração obtida por Azevedo (2012) para o sensor ECH₂O EC5 na situação específica de solo RMA Tipo 2, e posicionamento do sensor em um plano horizontal ao plano de compactação da camada de solo.

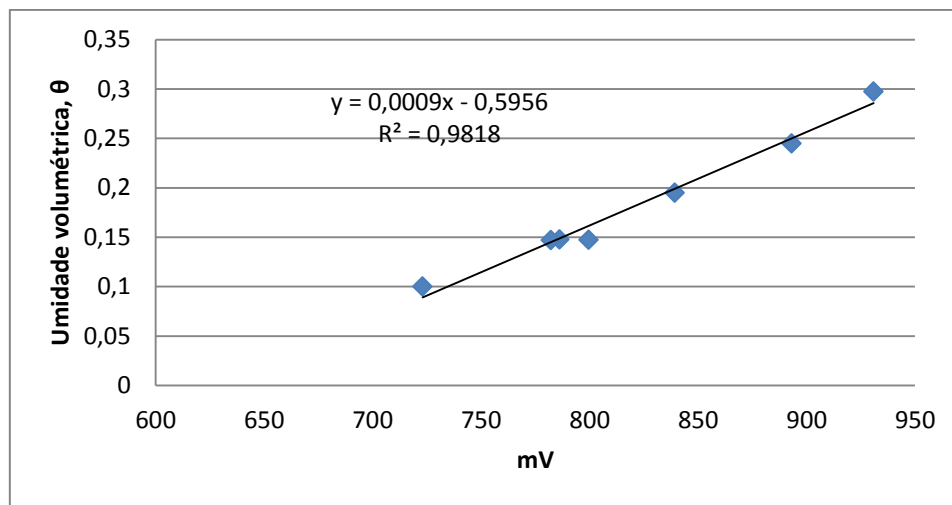


Figura 3.9 - Curva de calibração específica utilizando solo RMA para o sensor EC-5 ECHO (modificado de Azevedo, 2012)

Considerando o resultado obtido a equação de calibração específica que pode ser representada na Equação 3.2 como:

$$\theta = 9 * 10^{-4} . Raw_{mV} - 0,59 \quad (3.2)$$

Azevedo (2012) afirma que a equação de calibração específica obtida apresenta boa coincidência com os valores previstos com o solo em condição menos úmida, para umidades volumétricas acima de 35%. Para valores próximos da saturação, os resultados divergem mais do que o esperado. Esta diferença pode resultar da forma como a frente de umidade alcança o sensor e é distribuída em sua superfície, ou mesmo percebida em sua zona de influência.

Nos ensaios de coluna de pequeno porte realizados no âmbito da tese, a Equação 3.1 apresentou valores mais próximos dos valores de umidade utilizados na compactação do solo.

A Equação 3.2 apresentou valores menores que a de umidade de compactação para valores baixos de umidade. Desta forma, para fins de elaboração dos gráficos desta tese, optou-se por utilizar a Equação 3.1 proposta pelo fabricante. A experiência anterior da equipe de pesquisadores do Laboratório de Geotecnia da Universidade do Texas demonstra que a acurácia da equação proposta pelo fabricante para estimativa dos valores de umidade nos ensaios de infiltração com os perfis de solo utilizados nesta pesquisa é adequada para a análise do comportamento hidráulico não saturado do perfil.

Como sensor de sucção foi utilizado 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 onde está inserido, determina o potencial (kPa) e a temperatura do meio (Celsius). A Figura 3.10 apresenta o sensor MPS-1 em detalhe:



Figura 3.10 - Detalhe do sensor MPS-1 colocado sobre a superfície de uma camada de areia dentro do cilindro de execução da coluna.

Para registro e organização dos dados obtidos pelos sensores de umidade e de tensão, foi utilizado o software gratuito *ECH20 Utility* fornecido pela Decagon. O software permite programar o sistema para realizar leituras em intervalos determinados de tempo, gerando uma planilha de dados. Considerando que os testes realizados consumiam algumas dezenas de horas e duravam cerca de 6 dias, o software foi programado para realizar uma leitura a cada

30 minutos. A Figura 3.11 apresenta um exemplo da interface deste software, retirado de catálogo do fabricante.

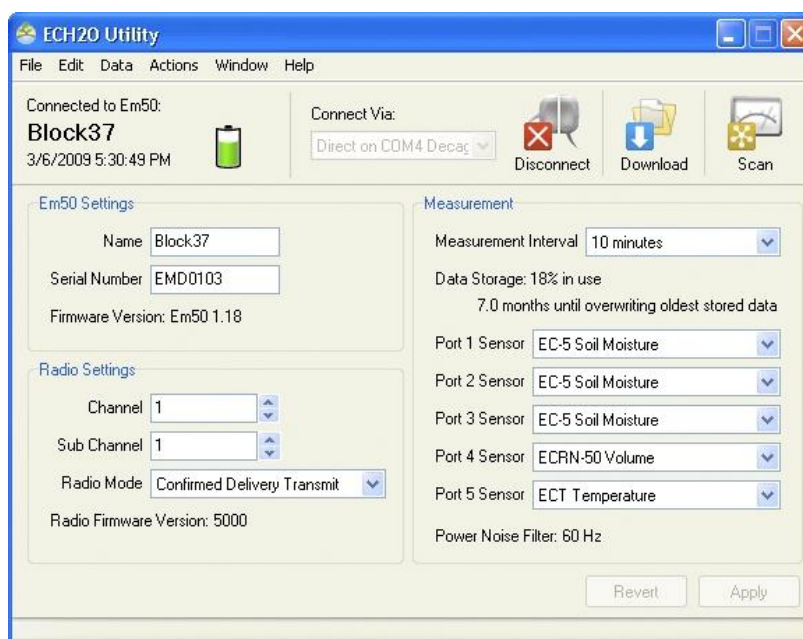


Figura 3.11 - Interface do Software *ECH2O Utility* (Fonte: www.decagon.com)

A Figura 3.12 apresenta o aspecto de uma coluna de solo RMA Tipo 2 sobreposta a uma camada de geotêxtil que, por sua vez, tem uma camada de pedregulhos como suporte e meio drenante. Foram ensaiados arranjos de perfil utilizando o mesmo solo RMA Tipo 2 com os três tipos diferente de geotêxteis não tecidos apresentados na Tabela 3.2, a saber, com massas por unidade de área de 200 g/m², 300 g/m² e 400 g/m².

Para entender de que forma os diferentes tipos de geotêxteis influenciavam na formação do fenômeno da barreira capilar, o solo RMA Tipo 2 era compactado nas mesmas condições de umidade e grau de compactação para os diferentes ensaios de coluna realizados. Considerando a quantidade de material disponível quando da realização dos ensaios ou a variação na quantidade de sensores a serem utilizados, alguns ensaios tiveram uma a espessura da camada de solo RMA Tipo 2 com diferentes alturas. Esta variação pode, em alguns casos, dificultar a comparação do comportamento do sistema entre ensaios distintos, mas o comportamento hidráulico da cobertura, quanto a formação ou não de barreira capilar é perfeitamente identificável.

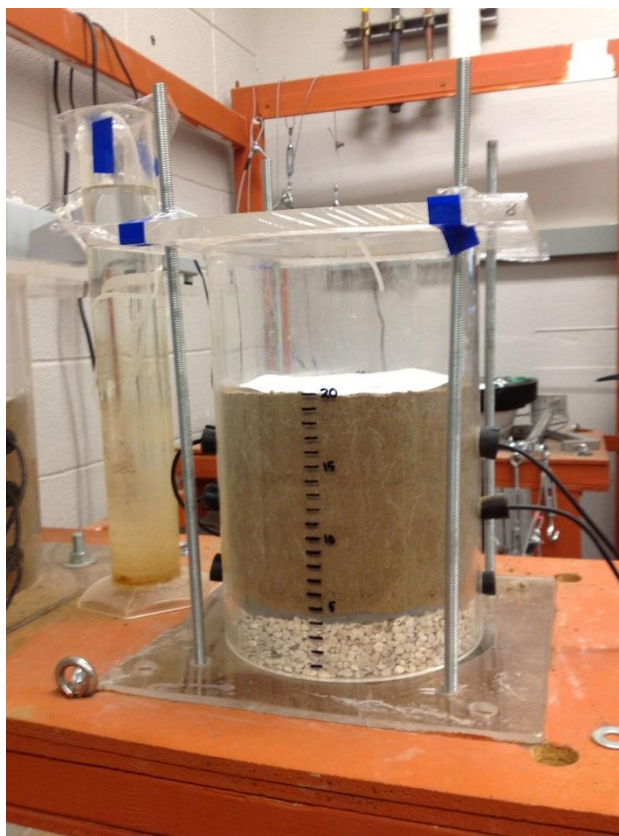


Figura 3.12 - Coluna para simulação de perfil de cobertura utilizando solo RMA Tipo 2 com presença de geotêxtil não tecido como camada de bloco capilar (camada de pedregulho com função de suporte e dreno)

Nos ensaios utilizando perfil de solo RMA Tipo 2 com geotêxtil, o solo era compactado em camadas com espessura final de 3 cm, em média, em uma umidade volumétrica inicial (θ_i) de 15%, o que equivalia a uma umidade gravimétrica inicial (w_i) de 10,2 %. O solo RMA Tipo 2 foi compactado em 80% da densidade máxima seca ($\gamma_{dm\acute{a}x}$), de 1,84 g/cm³, considerando a energia de compactação do ensaio Proctor Normal. A densidade relativa dos grãos (G_s) para o solo RMA Tipo 2 foi considerado igual a 2,71 e a umidade volumétrica do solo RMA Tipo 2 na saturação (θ_{sat}) foi estimada em 46%. A porosidade (n) do solo RMA Tipo 2 nestas condições de compactação foi igual a 0,46.

Para compreensão do comportamento hidráulico não saturado do perfil de solo e geotêxtil foi imposto um fluxo vertical descendente, com o auxílio de uma mini bomba peristáltica de fluxo variável, fabricada pela Fisher Scientific. Para os ensaios em solo RMA com presença de geotêxtil o fluxo médio de água para dentro do sistema variou de 0,19 ml/min a 0,23

ml/min. Considerando a área transversal da coluna de solo como 304 cm², a taxa de infiltração no sistema ficou em torno de 2×10^{-7} cm/s.

Para que a distribuição do fluxo de água descendente fosse o mais homogêneo possível ao longo da seção transversal da coluna, foi colocado no topo do perfil de solo um papel filtro que tinha a função de distribuir uniformemente o volume de água que era depositado na superfície. A Figura 3.13 ilustra como funcionava o sistema de molhagem da coluna.

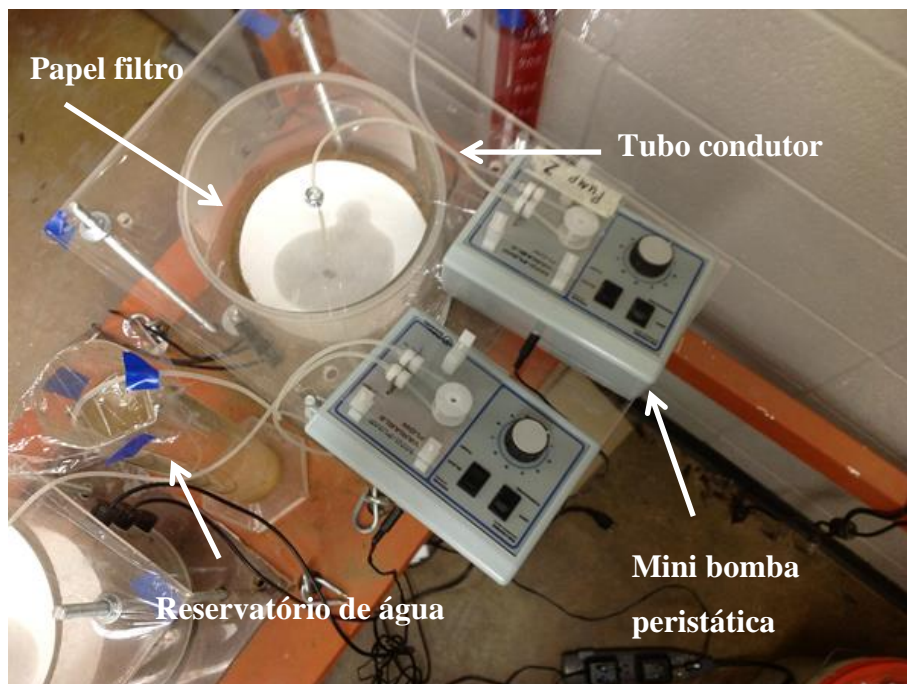


Figura 3.13 - Visão do sistema de molhagem da coluna de solo com as bombas peristálticas de fluxo variável, tubos condutores, reservatório de água e papel filtro para distribuição uniforme do fluxo.

O reservatório de água era composto por uma proveta com capacidade máxima de 1000 ml, na medida em que a água era adicionada ao perfil era necessário completar o nível da proveta, para garantir o fluxo constante durante o ensaio. A água da proveta era sempre mantida em seu volume máximo, assim, a cada recarga, era possível comparar o volume de água que saía da proveta com o tempo entre uma recarga e outra de água. Desta forma era possível calcular a taxa média de infiltração em cada intervalo de tempo.

Este procedimento para conferência da taxa de infiltração era necessária, porque a bomba peristáltica tinha uma regulagem analógica de velocidade de fluxo. A regulagem da bomba

tinha sido testada anteriormente com procedimentos simples de calibração, utilizando uma proveta com escala e medindo a taxa de média de fluxo para cada variação em sua regulação.

Como já afirmado, a realização de ensaios de infiltração em perfis de solo utilizando colunas devidamente instrumentadas pode ser um importante meio de compreender o comportamento hidráulico não saturado de um material. Foram realizados ensaios de coluna de solo utilizando apenas o solo RMA Tipo 2 para compreender o comportamento deste solo quando submetido ao processo de molhagem.

Quando da realização dos ensaios de coluna com a presença de solo e geossintético, optou-se por realizar ensaio de infiltração utilizando o solo RMA Tipo 2 como camada superior e outros geomateriais como camada granular. Estes ensaios tiveram por objetivo observar, por exemplo, quanto a camada de suporte ao geotêxtil, composta de pedregulhos, influenciou na formação da barreira capilar. Um dos perfis utilizou o solo RMA Tipo 2 como camada superior e uma camada de pedregulhos como solo granular. Outro perfil utilizou a areia Monterey nº30 como camada de solo granular para observar a formação, ou não, de barreira capilar. A Figura 3.14 mostra a aparência destes dois ensaios com diferentes perfis.

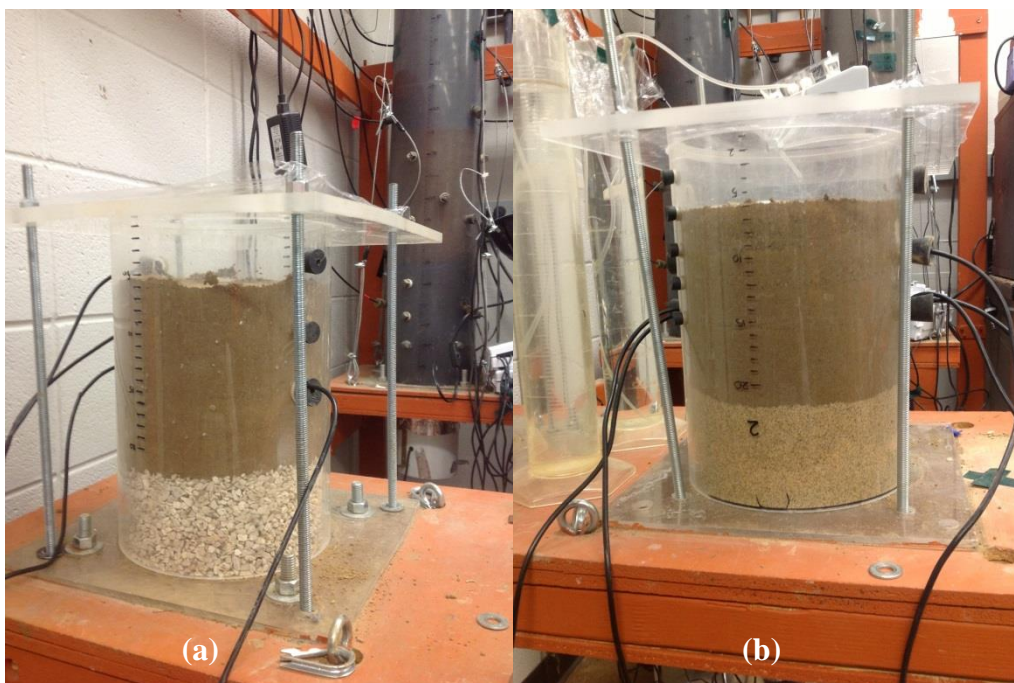


Figura 3.14 - Ensaios em coluna sem a presença de geossintético para observação do fenômeno de barreira capilar. (a) pedregulhos como camada granular e (b) areia monterey nº30 como camada de solo granular.

Os gráficos que indicam as variações de umidade e sucção nas diferentes configurações de perfil serão apresentados na seção de resultados. Considerando que o objetivo do sistema é aumentar a capacidade de retenção de água na camada de solo fino, foi importante comparar o tempo necessário para que o sistema sature a camada de solo acima do geotêxtil e o tempo necessário para que a frente de água atravesse a camada de geotêxtil. Os resultados poderão ajudar a compreender o quanto a presença do geotêxtil não tecido pode tornar mais efetiva a formação de barreira capilar e melhorar capacidade de retenção de umidade da camada superior.

3.2.2 - ENSAIO DE COLUNA SUSPensa (*HANGING COLUMN TEST*) PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DOS GEOTÊXTEIS

Para a determinação da curva característica dos geotêxteis não tecidos utilizados na pesquisa foi utilizado o ensaio de coluna suspensa, ou *Hanging Column Test*, semelhante ao proposto por Stormont *et al.*(1997). Foram ensaiadas amostras de geotêxteis enviadas do laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília. Foram utilizados geotêxteis não tecidos com diferentes gramaturas de 200 g/m², 300 g/m² e 400 g/m².

A coluna suspensa (*Hanging Column Apparatus*) que foi utilizada para a realização dos ensaios de determinação da curva de retenção de água dos geotêxteis não tecidos consiste em um reservatório de água em posição fixa e uma câmara onde é instalada a amostra de geotêxtil. A diferença de altura (h) entre a superfície da água do reservatório e a face superior da pedra porosa do funil de Bunchner, sobre o qual está colocada a amostra do geotêxtil, representa o valor da sucção aplicada à amostra ensaiada. Quando a amostra está na mesma linha horizontal do nível de água do reservatório de água, a sucção é zero, porque não há diferença de potencial hidráulico entre os dois pontos.

A estrutura na qual a câmara foi instalada permitia impor uma sucção máxima de cerca de 3,5 kPa (aproximadamente 35 cm de coluna d'água), o suficiente para drenar completamente uma amostra saturada de geotêxtil e obter o ramo de secagem da curva de retenção de água. A Figura 3.15 apresenta uma visão geral do equipamento montado no Laboratório de Geotecnia da Universidade do Texas em Austin.

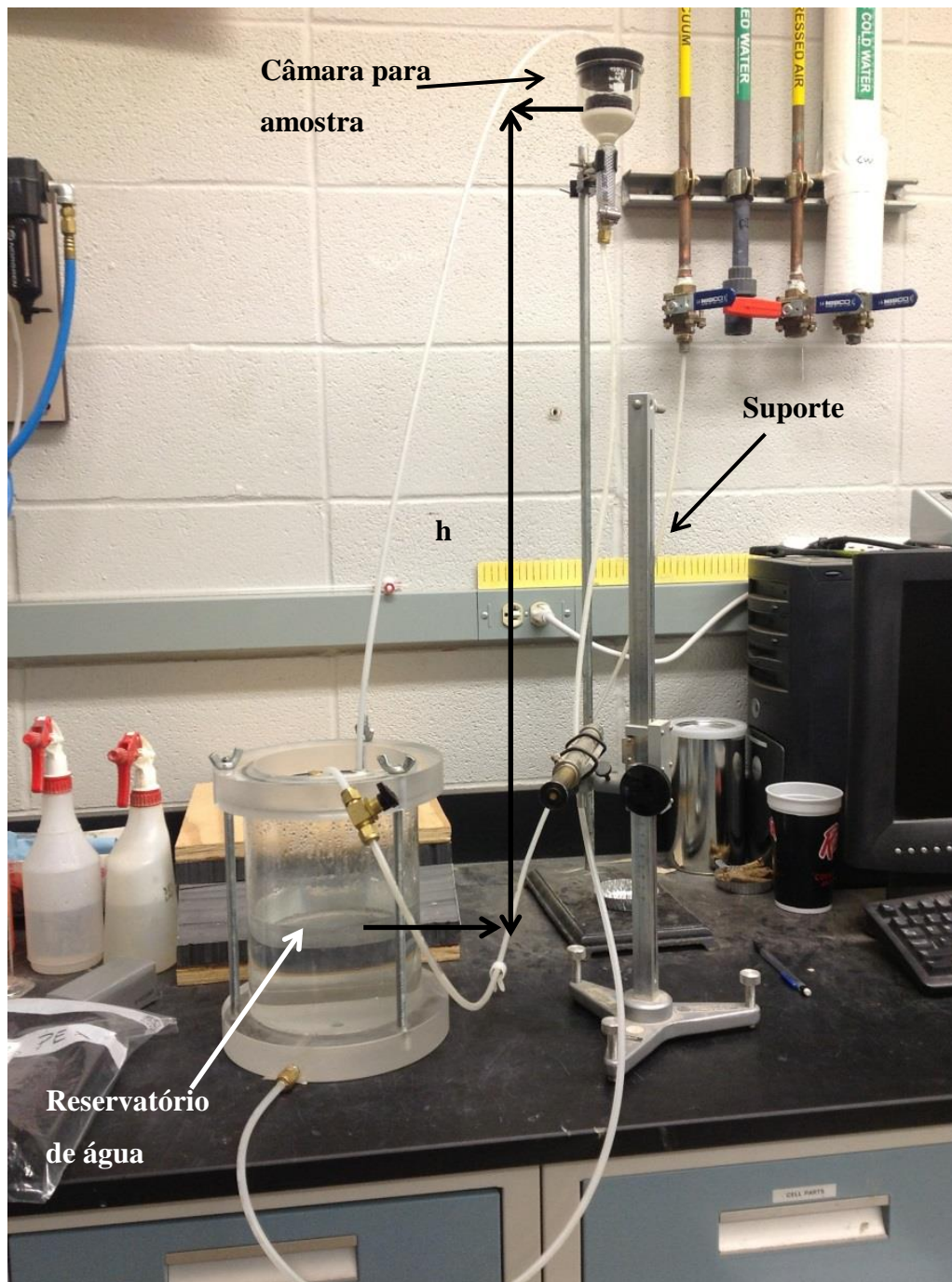


Figura 3.15 - Equipamento de coluna suspensa (Hanging Column Apparatus) utilizado para medição da curva característica de geotêxteis.

As amostras de geotêxtil utilizadas no ensaio tinham diâmetro médio de 5,5 cm e eram instaladas em um funil de Bunchner com aproximadamente 6 cm de diâmetro. A amostra ficava em contato direto com a pedra porosa do funil de Bunchner, que era mantida saturada durante todo o ensaio.

Para manter o contato da amostra com a superfície da pedra porosa foi colocado sobre a amostra um conjunto com massa de 133 g, composta por um contrapeso circular em metal e uma tela circular plástica colocada entre o contrapeso e a amostra de geotêxtil. A Figura 3.17 traz em detalhe o arranjo da câmara onde é instalado o geotêxtil, consistindo de um funil de Bunchner de vidro com pedra porosa. O valor de entrada da pedra porosa não foi determinado, mas é bem superior à sucção máxima que o sistema consegue impor, de forma que não há entrada de ar na pedra porosa. O sistema de contrapeso que mantém o geotêxtil em contato pleno com a pedra porosa contribui com uma pressão estimada em 0,55 kPa (549 N/m²). A Figura 3.16 apresenta este arranjo em detalhes.

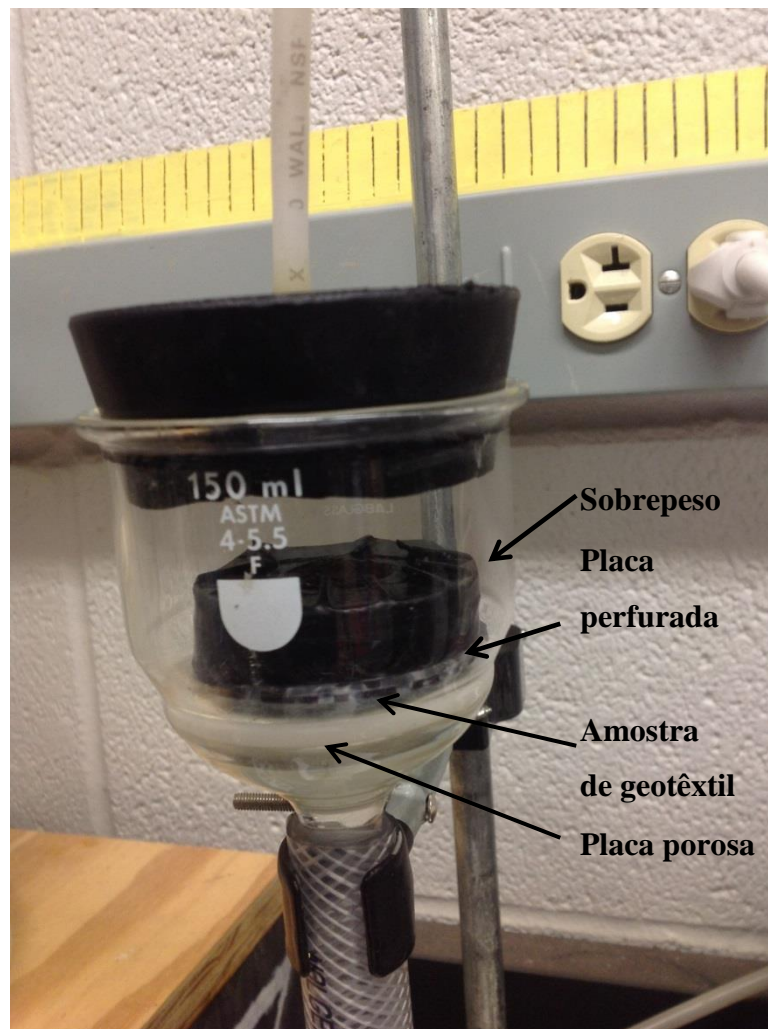


Figura 3.16 - Detalhe da câmara do ensaio de coluna suspensa onde é instalada a amostra a ser ensaiada.

As curvas características obtidas para os geotêxteis de diferentes espessuras e massas por unidade de área utilizados na pesquisa serão apresentadas na seção de resultados. Foram realizados ensaios obtendo a curva de retenção de água completa, com trajetórias de secagem e molhagem. A umidade volumétrica foi calculada por pesagem da amostra em balança de precisão e relacionando a massa de água presente com o seu volume. O grau de saturação depende da umidade volumétrica e da porosidade do geotêxtil.

3.2.3 - ENSAIOS DO PONTO DE BOLHA (*BUBBLE POINT TEST*) PARA OBTENÇÃO DA CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DE POROS

3.2.3.1 – EQUIPAMENTO MONTADO NA UNIVERSIDADE DO TEXAS EM AUSTIN

O equipamento para os ensaios de Ponto de Bolha (*Bubble Point Test*) foi desenvolvido na Universidade do Texas em Austin baseado no trabalho de Eun & Tinjum (2011), adaptando o procedimento previsto na norma ASTM 6767-11. A determinação da curva de distribuição de tamanho de poros do geotêxtil e qual a influência que poderia ter no comportamento do material quando elemento de um sistema de barreira capilar é muito importante.

O equipamento para realização do Ensaio de Ponto de Bolha consistia basicamente de uma fonte de gás confiável que pudesse exercer pressão sobre uma amostra de geotêxtil e um equipamento para medir a taxa de gás que passava pela amostra dentro de um intervalo de tempo para cada acréscimo de pressão.

Como fonte de gás e pressão foi utilizada ar comprimido já disponível nas instalações do laboratório. A instalação de ar comprimido se mostrou uma fonte confiável de pressão uma vez que, além da estabilidade da taxa de aplicação de ar; não apresentava condensação de água no sistema. A taxa de aplicação de pressão era controlada por um regulador de pressão, com sensibilidade suficiente para aplicar um fluxo de ar em acréscimos de cerca de 0,5 litros/min.

Para a metodologia do ensaio é importante determinar, para cada valor de pressão aplicado, qual a taxa de ar que passa através da amostra. Esta medida foi realizada com a utilização de um fluxômetro de área variável com uma esfera de aço como elemento de referência para medidas. A taxa máxima que o fluxômetro utilizado conseguia medir era de 14 LPM (litros por minuto), e a menor medida era cerca de 1 LPM, pela própria limitação do processo construtivo do fluxômetro.

Para realizar as medidas da pressão aplicada, o regulador de pressão foi conectado a um manômetro em “U”, chamado manômetro de ramo aberto, já disponível no laboratório. A pressão máxima que se conseguia medir com este instrumento era de 9 kPa, cerca de 90 cm de coluna de água. A Figura 3.17 mostra o equipamento montado sobre a bancada do laboratório.

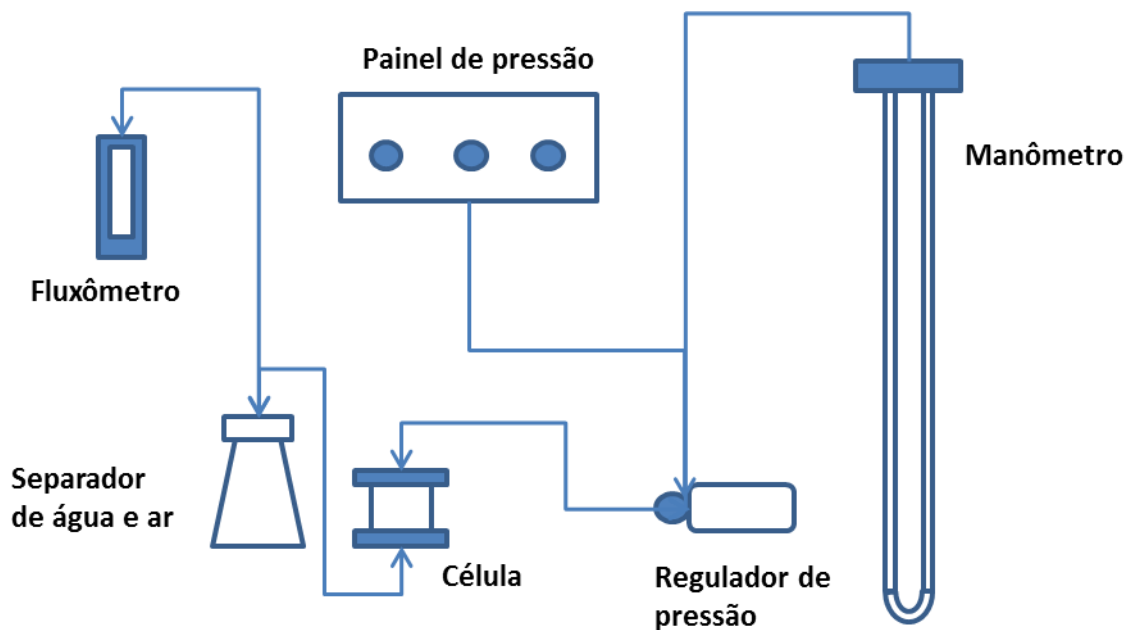


Figura 3.17 - Vista do equipamento para realização do ensaio de ponto de bolha montado no Laboratório de Geotecnia da UT-Austin.

Os testes foram iniciados com a amostra totalmente seca, aumentando gradualmente a pressão aplicada e medindo-se o fluxo de ar através da amostra. O gráfico resultante deste procedimento é uma curva que relaciona fluxo de ar passando pela amostra com pressão aplicada. Após o último estágio de pressão, a amostra era retirada da câmara e saturada para realização do ensaio no ramo úmido. Iniciando-se com a mesma amostra saturada, a aplicação

gradativa de pressão resultará na expulsão do líquido da amostra, a cada estágio aplicado. Ao final do último estágio de pressão a amostra estará próxima de sua umidade residual.

A seguir são apresentados alguns detalhes da instalação da amostra de geotêxtil não tecido na câmara. Figura 3.18 ilustra a sequência da montagem da célula e o posicionamento de uma amostra de geotêxtil não tecido em seu interior.

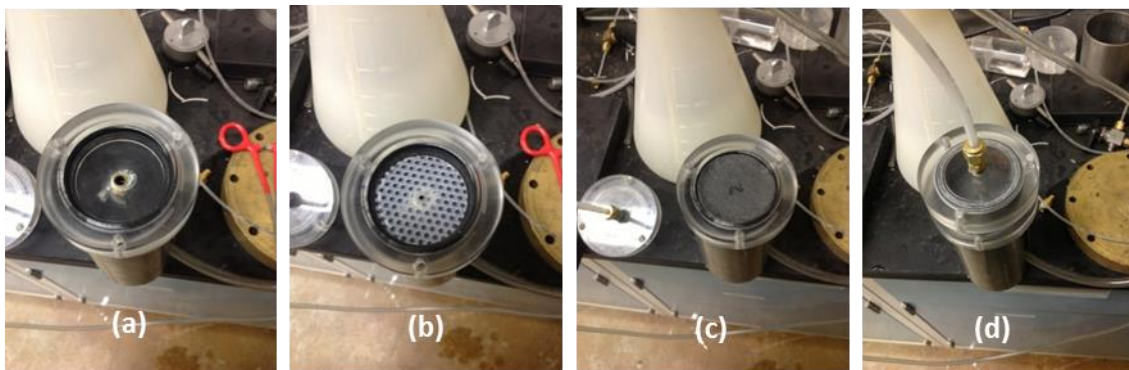


Figura 3.18 - Sequência de montagem da amostra de geotêxtil dentro da célula. (a) Célula aberta com orifício para drenagem de água; (b) tela perfurada para apoio da amostra, (c) colocação da amostra de geotêxtil saturada; (d) Célula fechada e pronta para início do ensaio.

Foram ensaiadas amostras de geotêxtil não tecido com gramaturas de 200 g/m², 300 g/m² e 400 g/m². Os gráficos apresentando os ramos úmido e seco do teste, bem como as curvas de distribuição de poros obtidas, serão apresentados na seção de resultados.

3.2.3.2 – EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO NA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Considerando o conhecimento adquirido durante o período de estágio doutorado sanduíche na Universidade do Texas em Austin, decidiu-se por desenvolver um equipamento para determinação da distribuição de poros de geossintéticos baseado tanto na norma americana ASTM D-6767 quanto no trabalho de Eun & Tinjum (2011), que já havia sido referência para o trabalho desenvolvido em Austin, TX. A Figura 3.19 apresenta uma visão geral do equipamento instalado no laboratório do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, na área destinada à pesquisa em geossintéticos,

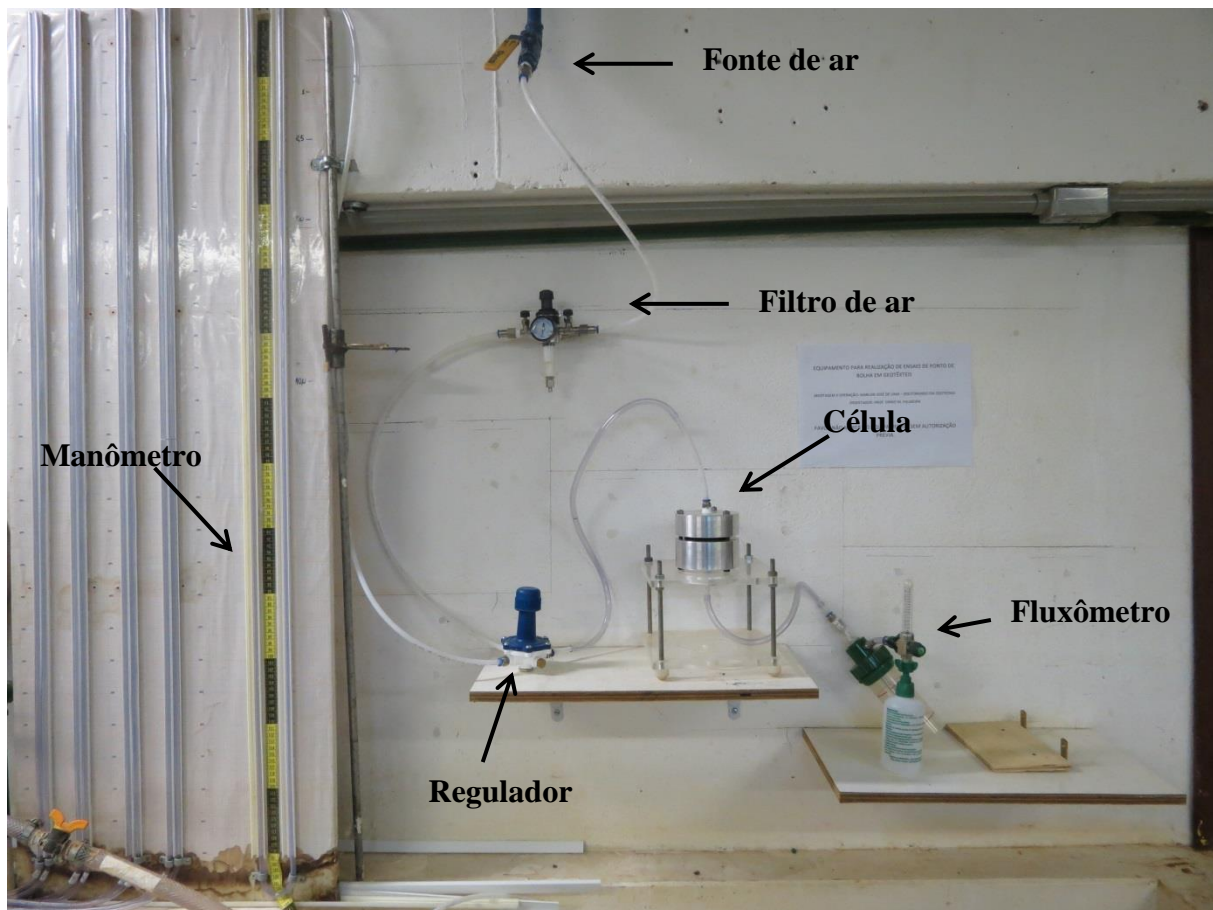


Figura 3.19 - Equipamento montado na Universidade de Brasília para determinação da curva de distribuição de poros em geossintéticos pela metodologia do ponto de bolha.

Os elementos que compõem o equipamento para o teste de ponto de bolha foram adquiridos ou adaptados com peças e materiais disponíveis, tanto no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília quando encontrados no próprio Distrito Federal. A intenção foi montar um sistema de baixo custo que permitisse a fácil reprodução por outros pesquisadores ou grupos interessados nesta linha de pesquisa.

Utilizando o sistema de ar comprimido existente como fonte de gás e pressão, havia uma preocupação sobre a possível formação de água por condensação. Assim foi importante a instalação de um filtro de ar com purgador entre a fonte de ar comprimido e a célula onde a amostra de geotêxtil era instalada.

O regulador de ar permitiu que fossem impostos acréscimos de pressão e de fluxo de ar, de forma gradativa, para a realização adequada do ensaio. A célula para instalação da amostra de

geotêxtil foi torneada em alumínio, utilizando anéis de borracha para a vedação contra vazamento de água e ar. A célula, composta por duas partes que se mantêm solidárias com a utilização de parafusos, tem uma placa perfurada com furos de diâmetro de 2 mm sobre a qual é instalada a amostra de geotêxtil e tem função tanto de suporte quanto drenante. A Figura 3.20 apresenta detalhes da célula vazia e com a instalação do geotêxtil. A amostra de geotêxtil é ensaiada com um diâmetro de 60 mm.

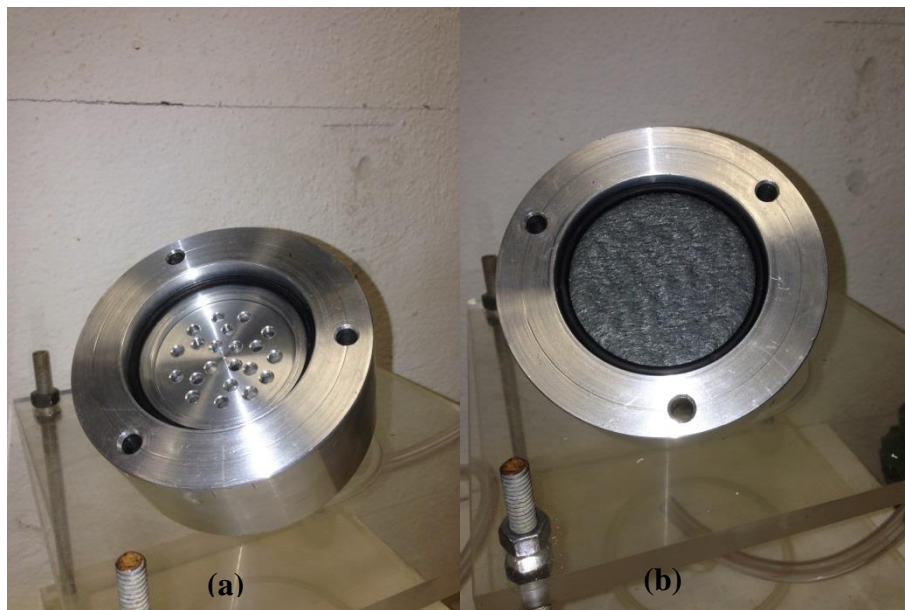


Figura 3.20 - Detalhes da célula utilizada no ensaio de ponto de bolha na Universidade de Brasília, (a) célula vazia com a placa perfurada; (b) amostra de geotêxtil instalada na célula.

Quando a amostra é colocada sobre a placa perfurada, que tem um diâmetro de 50 mm, esta pode ser considerada a área ensaiada da amostra, que é confinada dentro da célula e fixada por um anel de borracha para que não fosse dado espaço para vazamento de ar ou água. Assim todo o ar aplicado passa através da amostra.

Para a medição do ar que passa através da amostra de geotêxtil, foi instalado no sistema um fluxômetro de uso medicinal, capaz de medir tanto o fluxo de oxigênio gasoso quanto de ar comprimido. Optou-se por este tipo de fluxômetro de área variável, tanto por estar disponível no mercado de forma acessível quanto por seu baixo custo e pelo conhecimento anterior sobre seu funcionamento. A capacidade máxima de medida do fluxômetro utilizado é de 15 LPM.

Para a medida de pressão foi utilizado um manômetro de tubo em “U”, também chamado de manômetro de ramo aberto, onde a medida de pressão é dada pela diferença de cota nos dois ramos do manômetro. O manômetro foi preenchido com água destilada e tem uma capacidade de registro de pressão de até 1,3 m.c.a, equivalente a aproximadamente 12 kPa.

4 – RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 – ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO EM COLUNAS DE PEQUENO PORTE.

Conforme descrito na seção de Materiais e Métodos, foi realizada uma série de ensaios de infiltração em colunas de pequeno porte para compreender o comportamento hidráulico não saturado de um perfil de cobertura com diferentes configurações. Para o molde dos perfis de solo foram utilizadas colunas de acrílico transparente de pequeno porte, com um diâmetro interno de aproximadamente 19,7 cm (20 cm de diâmetro externo) e altura total de 30 cm. Os solos utilizados nos ensaios eram compactados diretamente no cilindro de acrílico, utilizando-se um pilão de compactação.

A configuração dos perfis ensaiados considerava sempre o solo RMA Tipo 2 como camada superior de cobertura. A camada subjacente ao solo RMA Tipo 2 foi executada com diferentes configurações de materiais, a fim de observar o comportamento de diferentes perfis de cobertura. Foram utilizadas combinações com geotêxteis não tecidos de diferentes massas por unidade de área. As camadas de base do perfil foram executadas com areia *Monterey* nº 30 ou pedregulhos, com e sem a presença do geotêxtil, a fim de compreender a influência de cada material no comportamento hidráulico do perfil.

Foi também realizado ensaio de infiltração em um perfil composto apenas de solo RMA Tipo 2. Este ensaio foi realizado para avaliar o comportamento do perfil na presença de fluxo, bem como a influência da placa perfurada de acrílico sobre a qual os perfis eram instalados, no acúmulo de água no sistema.

4.1.1 – COLUNA COM PERFIL DE SOLO RMA TIPO 2

A coluna de RMA Tipo 2 tinha espessura total de 19 cm. Foi compactada em 6 camadas, sendo a camada de base com 4 cm e as demais com 3 cm cada. O diâmetro da amostra ensaiada é de 19,7 cm, equivalente ao diâmetro interno do cilindro de acrílico no qual foi compactada. Uma mini-bomba peristáltica foi utilizada para infiltrar água no perfil.

A taxa de infiltração pôde variar ao longo do ensaio devido a própria instabilidade da bomba peristáltica e eventos como a formação de bolhas de ar nos pontos de contato dos tubos condutores de água. O ensaio foi realizado com uma taxa de infiltração média de 0,32 ml/min. Considerando a área transversal da amostra ensaiada com 304 cm², tem-se uma taxa de infiltração equivalente a $1,75 \cdot 10^{-7}$ m/s. Esta taxa de infiltração é menor que a condutividade hidráulica saturada do Solo RMA Tipo 2. Não foi observada formação de poropressão positiva na superfície do solo durante a infiltração.

A Figura 4.1 ilustra a posição de instalação dos sensores de umidade no perfil de solo RMA Tipo 2. Os sensores ECH₂O EC5 foram instalados nas profundidades de 1,5 cm, 7,5 cm, 13,5 cm e 17 cm a partir da superfície do perfil. São consideradas as dimensões externas do cilíndrico de acrílico. O diâmetro interno do cilindro, e também da amostra ensaiada é de 19,7 cm.

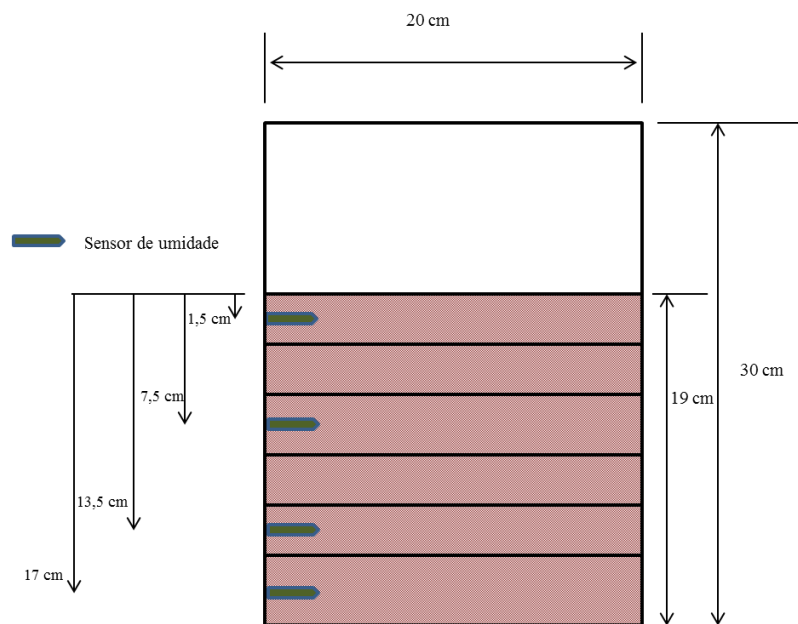


Figura 4.1 - Esquema com posição dos sensores de umidade para ensaio de infiltração em perfil de solo RMA Tipo 2.

A Figura 4.2 apresenta o resultado das leituras dos sensores, considerando os valores de umidade volumétrica (adimensional) e o volume infiltrado (ml). As camadas de solo foram compactadas na mesma umidade volumétrica, mas as leituras indicam uma diferença entre as umidades de cada camada, variando de 0,17 a 0,23. Esta diferença na umidade volumétrica

pode ter ocorrido como consequência de uma pequena variação nos volumes de solo e água utilizados na compactação ou variação de energia na compactação. Estas diferenças nas umidades volumétricas iniciais não comprometeram a análise do perfil de umidade.

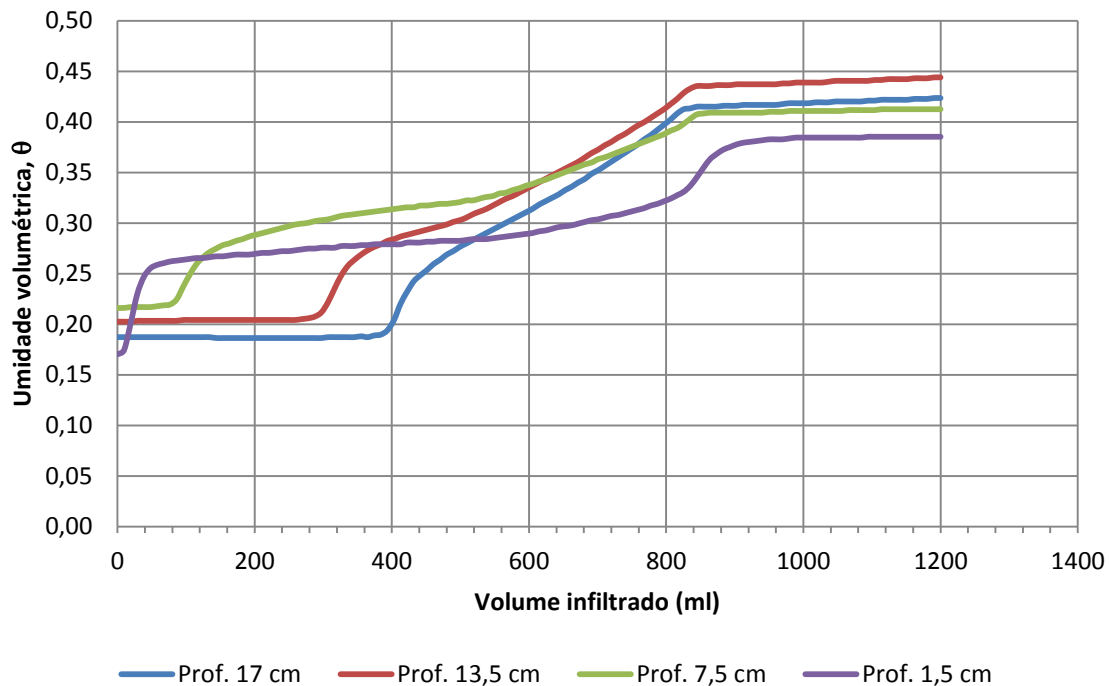


Figura 4.2 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o volume infiltrado de água para uma coluna de solo RMA Tipo 2.

O sensor instalado na profundidade de 1,5 cm registra a umidade volumétrica para a região da amostra naquele ponto após um volume de água infiltrado de aproximadamente 20 ml. Por ser o ponto mais próximo da superfície, o valor da umidade volumétrica cresce rapidamente até um volume infiltrado de 40 ml, sofrendo pouca variação no valor de umidade para os volumes de 40 ml e 680 ml. Após este valor de volume infiltrado a umidade volumétrica nesta primeira camada sofre novo acréscimo considerável, mantendo um valor constante após cerca de 900 ml de volume de água infiltrado.

O sensor instalado a uma profundidade de 7,5 cm registra variação da umidade volumétrica para um volume infiltrado de 80 ml, quando o fluxo de água na camada anterior já estava com um valor constante. O valor registrado pelo sensor neste ponto sofreu um acréscimo acelerado até o ponto próximo de 200 ml. A partir deste ponto a umidade volumétrica aumenta até alcançar um valor constante para cerca de 840 ml de água infiltrada no sistema.

O sensor instalado na profundidade de 13,5 cm registra alteração na umidade volumétrica com cerca de 280 ml de volume de água infiltrado no sistema, indicando que a frente de umidade alcançou aquele ponto. A partir deste ponto o valor da umidade volumétrica cresce a uma taxa aproximadamente constante até próximo de 840 ml de volume de água infiltrado no sistema, atingindo-se o equilíbrio de fluxo nesta camada de solo.

A frente de umidade alcança o último sensor, instalado a uma profundidade de 17 cm, com cerca de 400 ml de água infiltrada no sistema. A partir deste ponto o valor de umidade volumétrica cresce até um valor próximo de 840 ml, quando a umidade fica constante, indicando um equilíbrio no fluxo de água no sistema.

Os valores de umidade permanecem inalterados após 900 ml de volume de água infiltrado no perfil porque, além deste ponto, toda a água que entra na superfície sai pela placa de acrílico perfurada sobre a qual está instalado o perfil. Observou-se que a placa de acrílico perfurada interfere pouco no acúmulo de umidade no perfil de solo, uma vez que a taxa de aumento da umidade volumétrica nos sensores instalados nas profundidades de 13,5 cm e 17 cm são bem próximas. Porém, deve haver algum efeito de barreira capilar no contraste entre o tamanho dos poros do solo e o diâmetro dos furos da placa de acrílico.

A Figura 4.3 mostra os registros dos sensores de umidade em função do tempo de infiltração, considerando uma taxa de infiltração média de 0,32 ml/min. O tempo de realização do ensaio foi de 3700 min, com infiltração constante.

Com cerca de 30 min de infiltração a frente de umidade alcança o primeiro sensor. Após cerca de 150 min de infiltração a umidade neste ponto sofre acréscimo a uma taxa menor até um acréscimo considerável por volta de 2100 min. O valor da umidade volumétrica fica constante a partir deste instante, com 2800 min de infiltração, quando o fluxo desta camada entra em equilíbrio. Os demais sensores registram acréscimos de umidade até alcançarem um ponto onde não há mais mudança no valor da umidade, com cerca de 2600 min de infiltração.

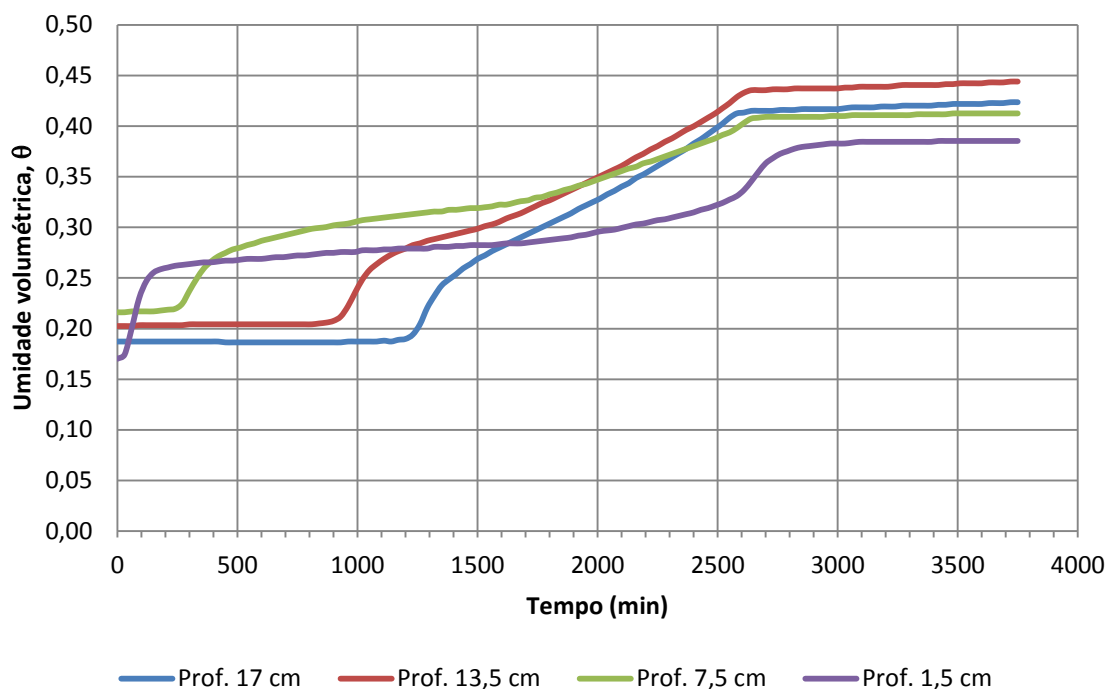


Figura 4.3 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o tempo de infiltração para coluna de solo RMA Tipo 2.

Considerando o conjunto das leituras dos quatro sensores, percebe-se que por volta de 2800 min de infiltração a leitura dos quatro sensores permanece constante, indicando que o fluxo de água no perfil está em equilíbrio. A partir deste ponto a água que entra no sistema sai pela placa de acrílico perfurada no fundo do perfil.

A Figura 4.4 apresenta a variação da umidade volumétrica do solo ao longo do tempo considerando as leituras dos sensores nas diferentes profundidades. Nas primeiras 8 horas de infiltração a variação da umidade ocorre na metade superior do perfil. Após 24 horas de infiltração, alguma variação de umidade volumétrica já é observada nas partes inferiores do perfil de solo. Após 40 horas de infiltração, há um acréscimo de umidade considerável, principalmente a partir na metade inferior do perfil, indicando um acúmulo maior de umidade nesta região, possivelmente devido ao contraste entre os poros do solo e o diâmetro dos furos da placa de acrílico na base do perfil.

A partir de 48 horas de infiltração a variação da umidade está dentro de uma faixa de variação de leituras do próprio sensor, indicando que a água passou pelas aberturas da placa de acrílico

perfurada. O fluxo de água no sistema entra em equilíbrio e toda água que entra no sistema sai pela base do perfil.

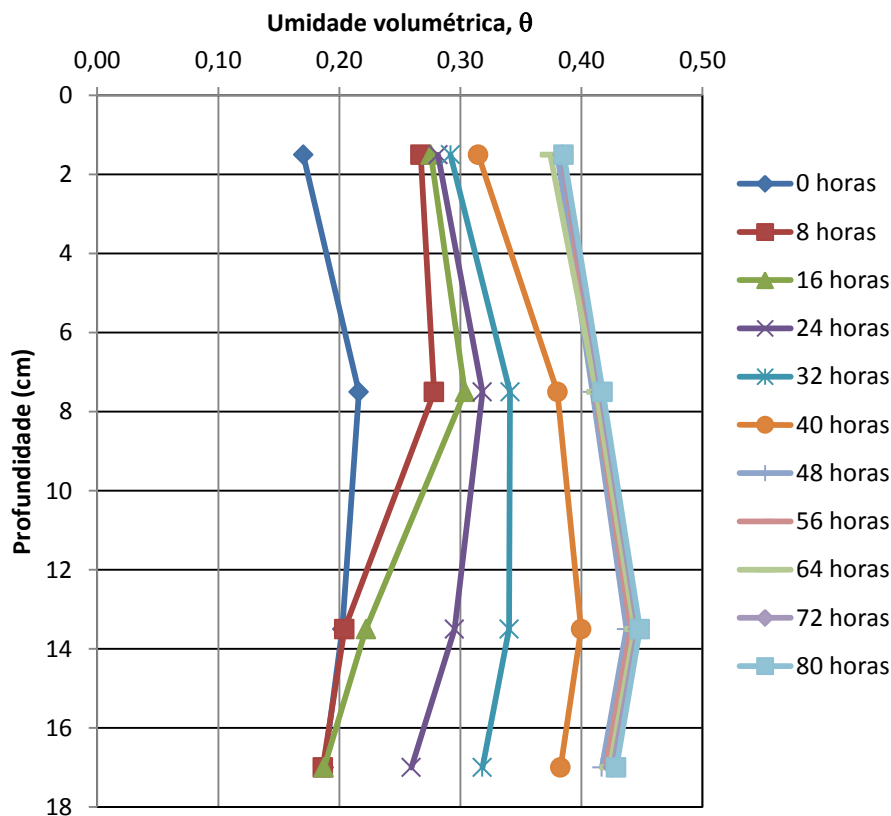


Figura 4.4 -- Variação da umidade volumétrica ao longo do perfil de solo RMA Tipo 2 em função do volume de água infiltrado.

4.1.2 – COLUNA COM PERFIL DE SOLO RMA TIPO 2 COM GEOTÊXTIL DE 200 g/m²

Foi realizado ensaio de infiltração com um perfil composto de solo RMA Tipo 2 com espessura de 17 cm, compactado em 6 camadas. Uma camada de topo com 2 cm de espessura final e outras 5 camadas com 3 cm de espessura cada. O solo foi sobreposto a uma camada de geotêxtil não tecido com 200 g/m² de massa por unidade de área, apoiado em uma camada de pedregulho com 4 cm de espessura. O perfil completo tinha cerca de 21,2 cm de espessura.

A Figura 4.5 ilustra a posição de instalação dos sensores para monitoramento da infiltração no perfil. Para medição de umidade foram instalados sensores ECH₂O EC5 nas profundidades de 3,5 cm, 9,5 cm e 15,5 cm a partir da superfície do perfil. Foi também instalado um sensor de sucção modelo MPS-2 na profundidade de 15,5 cm.

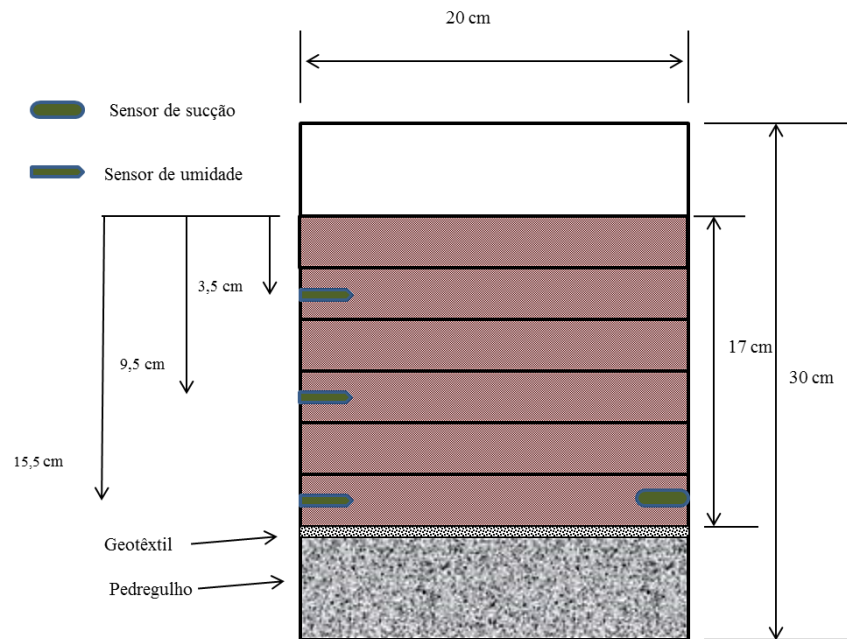


Figura 4.5 - Esquema com posição dos sensores de umidade para ensaio de infiltração em perfil composto de solo RMA Tipo 2 com presença de geotêxtil com 200 g/m² de gramatura.

Neste arranjo o perfil de solo em conjunto com o geotêxtil não tecido compõe o sistema que simula uma camada de cobertura para uma área de disposição final de resíduos sólidos. A função do pedregulho é servir como camada drenante, visando reduzir os efeitos da placa de acrílico perfurada no comportamento hidráulico do perfil.

Como dispúnhamos de apenas 3 sensores de umidade, a opção pela profundidade de instalação dos sensores considerou a necessidade de monitorar melhor o comportamento no fundo do perfil, onde havia a expectativa de aumento da umidade. Devido a dimensão das camadas optou-se por deixar uma camada de solo livre de monitoramento acima de cada sensor.

A Figura 4.6 apresenta as leituras dos sensores de umidade volumétrica, em função do volume total infiltrado na amostra. A taxa média de infiltração neste ensaio foi de 0,19 ml/min.

Considerando a seção transversal do perfil de solo com um diâmetro de 19,7 cm e uma área transversal de 304 cm², a média de infiltração corresponde a $1,04 \times 10^{-7}$ m/s. Nestas condições de infiltração não foi detectada formação de poro pressão positiva na superfície do perfil.

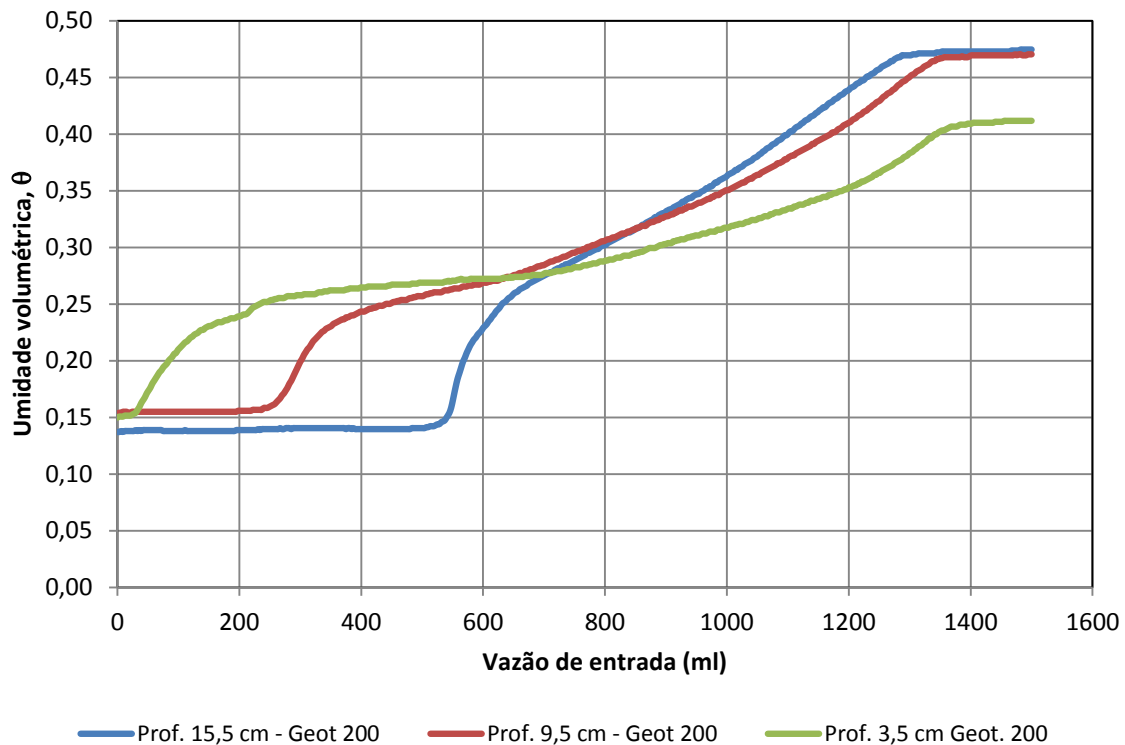


Figura 4.6 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o volume de água infiltrada - Perfil de solo RMA Tipo 2 com geotêxtil com 200 g/m².

A frente de umidade aciona o sensor instalado a 3,5 cm de profundidade com cerca de 40 ml de volume de água infiltrados. A partir deste valor a umidade volumétrica neste ponto aumenta significativamente até um valor total infiltrado de cerca de 280 ml. A partir de um volume infiltrado de aproximadamente 1400 ml o valor da umidade neste ponto permanece inalterado com o acréscimo de água de água no sistema.

O sensor instalado a 9,5 cm de profundidade registra alteração na umidade volumétrica com cerca de 250 ml infiltrados. O valor de umidade volumétrica neste ponto aumenta até que, com um volume infiltrado de aproximadamente 1360 ml, o valor registrado pelo sensor fica inalterado em 0,47, não sofrendo acréscimos mesmo com a alimentação contínua de água no sistema.

Com aproximadamente 590 ml de volume de água infiltrado a frente de umidade alcança o sensor instalado a 15,5 cm de profundidade, próximo da interface entre o solo e o geotêxtil. O sensor continua registrando um acréscimo na umidade nesta profundidade até um valor próximo de 1360 ml. A partir deste ponto de infiltração o valor da umidade volumétrica permanece inalterado em 0,47.

Considerando as leituras dos três sensores de umidade volumétrica, pode-se observar que há um acréscimo maior de umidade na camada de solo mais próxima da interface solo- geotêxtil, monitorada pelo sensor com 15,5 cm de profundidade. Mesmo com um valor inicial de umidade menor, com cerca de 800 ml de volume infiltrado, o valor registrado pelo sensor a 15,5 cm ultrapassa o registrado pelo sensor instalado a 9,5 cm. Isto indica que há um acúmulo na parte inferior do perfil de solo, possivelmente pelo efeito de barreira capilar causado pela presença do geotêxtil.

Os valores finais de umidade volumétrica dos sensores instalados a 9,5 cm e 15,5 cm são praticamente iguais; 0,47, indicando que o acúmulo de água no solo foi suficiente para saturar a metade inferior do perfil. O valor menor registrado pelo sensor a 3,5 cm de profundidade indica que, apesar do acúmulo de água no sistema, a água rompe a barreira do geotêxtil próximo de 1400 ml de água infiltrado, ainda não sendo suficiente para saturar o topo do perfil.

A Figura 4.7 apresenta os dados de umidade volumétrica em função do tempo de infiltração. No início do ensaio as umidades medidas nos diferentes pontos estavam bem próximas, variando dentro da taxa de precisão do sensor. A frente de umidade alcança o primeiro sensor instalado a 3,5 cm da superfície superior da coluna cerca de 200 minutos após o início do gotejamento, ou seja, com pouco mais de 3 horas de precipitação. A partir deste ponto a variação de umidade volumétrica aumenta até que, próximo de 7000 min de infiltração, o valor registrado pelo sensor neste ponto não sofre mais alteração, mesmo continuando-se o processo de molhagem.

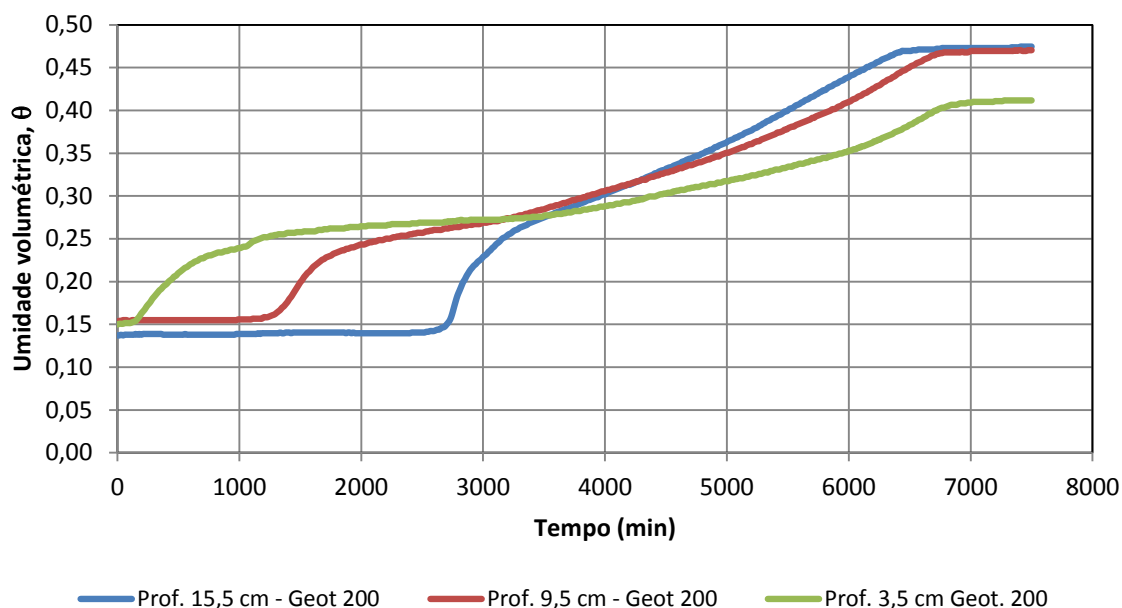


Figura 4.7 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o tempo de infiltração. Perfil de solo RMA Tipo 2 com a presença de geotêxtil de 200 g/m².

Com aproximadamente 1200 min de infiltração a frente de umidade alcança o sensor instalado na profundidade de 9,5 cm, que também registra uma taxa de variação de umidade volumétrica crescente. O valor da umidade permanece inalterado, próximo dos 7000 min de infiltração, indicando que o fluxo de água na camada fica constante com a saturação do meio.

Após cerca de 2600 minutos de infiltração, a frente de umidade aciona o sensor instalado a 15,5 cm da superfície, próximo da interface entre o solo compactado e a camada de geotêxtil. O valor de umidade para este sensor fica constante também próximo de 7000 min de infiltração. Semelhante ao sensor instalado a 9,5 cm da superfície, a umidade volumétrica neste último estágio fica em 0,47, com o solo saturado nestas camadas do perfil.

Os comportamentos dos sensores de umidade, principalmente dos instalados a 9,5 cm e 15,5 cm mostram que ocorreu acúmulo de água na base do perfil. Este comportamento indica a ocorrência do fenômeno da barreira capilar, devido ao contraste de tamanho de poros entre o solo e o geotêxtil. O valor de umidade constante registrado pelos sensores, em torno de 7000 min de infiltração, indica que a água rompeu a barreira do geotêxtil, saturando o material, no fenômeno conhecido como *breakthrough*. A partir deste ponto, todo o volume de água que entra no sistema sai pela sua base.

A Figura 4.8 traz os valores de sucção e umidade registrados pelo sensor instalado na profundidade de 15.5 cm. Com cerca de 500 ml de água infiltrada no perfil o sensor MPS-2 registra redução no valor da sucção. Há um intervalo de tempo entre o registro da alteração da umidade e a queda da sucção, possivelmente pela diferença de sensibilidade entre os sensores.

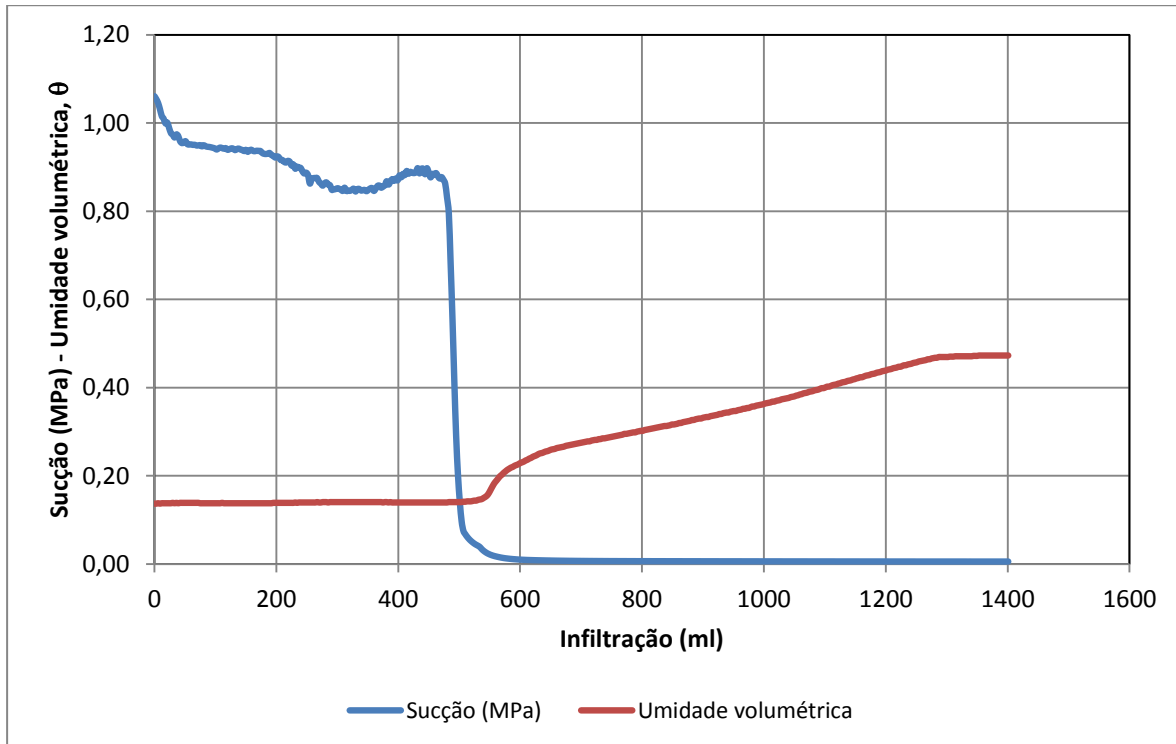


Figura 4.8 - Variação dos valores de sucção e umidade volumétrica em relação ao volume infiltrado no perfil de solo RMA Tipo 2 e geotêxtil com gramatura de 200 g/m².

Em um intervalo entre 500 ml e 600 ml de volume de água infiltrado, o sensor MPS-2 registra uma redução gradativa no valor da sucção no ponto próximo da interface entre o solo e o geotêxtil. A partir de 600 ml de volume de água infiltrado o valor de sucção neste ponto fica abaixo de 10 kPa e permanece próximo a este valor até o final do ensaio. O acréscimo da umidade volumétrica e redução da sucção para valores próximos de zero, indica o acúmulo de água pelo efeito de barreira capilar.

A Figura 4.9 demonstra a variação do perfil de umidade ao longo do tempo de infiltração para o perfil composto por solo compactado e geotêxtil de 200 g/m².

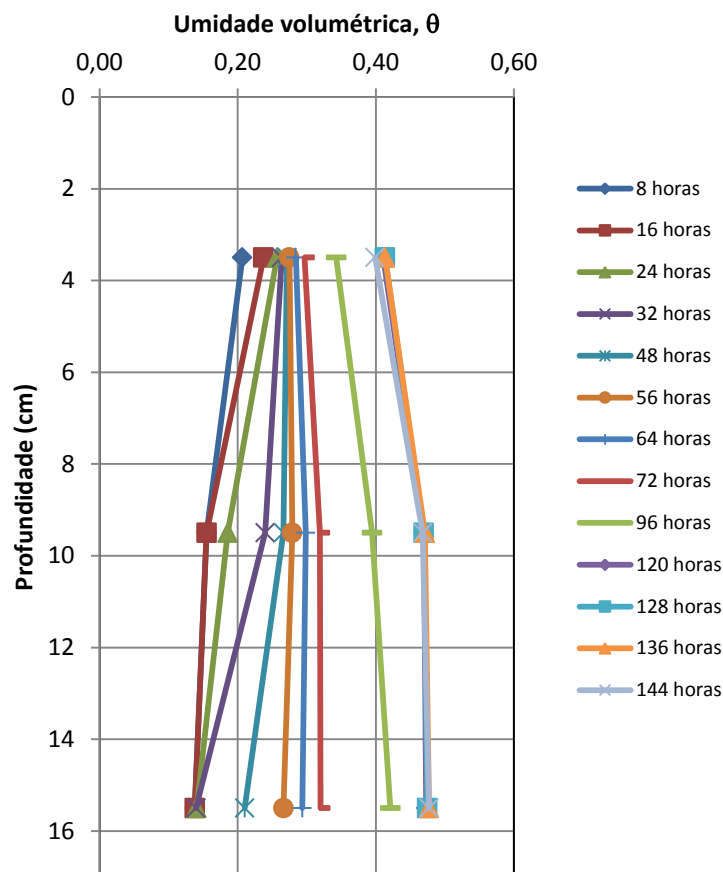


Figura 4.9 - Variação da umidade volumétrica em função do volume infiltrado, ao longo do perfil de solo RMA Tipo 2 com geotêxtil de 200 g/m².

4.1.3 – COLUNA COM PERFIL DE SOLO RMA TIPO 2 COM GEOTÊXTEL COM 300 g/m².

Foi também realizado ensaio de infiltração considerando uma estrutura de cobertura composta por um perfil de solo RMA Tipo 2 com espessura total de 15 cm e diâmetro de 19,7 cm, sobreposto a uma camada de geotêxtil não tecido com gramatura de 300 g/m². O perfil de solo foi compactado em 5 camadas com 3 cm de espessura cada uma. O conjunto formado por solo e geotêxtil foi apoiado sobre uma camada de 4 cm de pedregulho, com função exclusivamente de suporte e dreno.

A Figura 4.10 ilustra o esquema de instalação dos sensores de umidade e sucção. Foram

instalados três sensores ECH₂O EC5 nas profundidades de 1,5 cm; 7,5 cm e 13,5 cm; em relação a superfície. Na profundidade de 13,5 cm foi instalado ainda um sensor de sucção MPS-2.

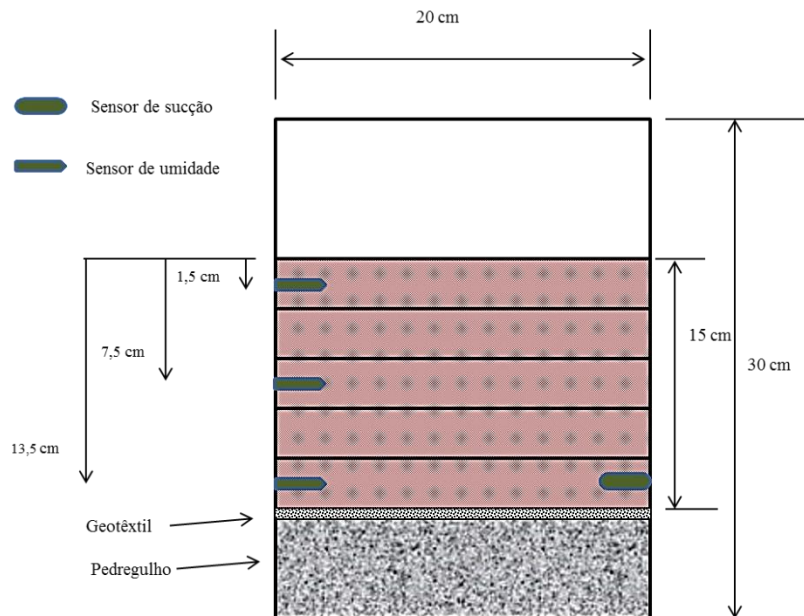


Figura 4.10 - Esquema com posição dos sensores de umidade para ensaio de infiltração em perfil composto de solo RMA Tipo 2 com presença de geotêxtil com 300 g/m² de gramatura.

A água foi infiltrada no sistema por gotejamento, com vazão média de 0,16 ml/min, aproximadamente $8,6 \times 10^{-8}$ m/s. Esta taxa de infiltração não permitiu a geração de poro pressão positiva sobre a superfície do perfil de solo, garantindo um avanço regular da frente de umedecimento.

As leituras de umidade volumétrica para cada ponto no perfil, apresentadas no gráfico da Figura 4.11, indicam que a frente de molhagem avança de forma regular, acionando os sensores em sequência. Com cerca de 20 ml de água infiltrada, o sensor instalado a 1,5 cm registra variação da umidade. Em um intervalo entre 200 ml e 700 ml de volume infiltrado, o sensor neste ponto registra uma umidade praticamente constante, em torno de 0,26. O registro deste sensor sofre novo acréscimo após 700 ml de infiltração, registrando valores finais de umidade em torno de 0,32.

Ao contrário do observado nos outros ensaios, não há um trecho final da curva onde a umidade fique constante com o acréscimo de umidade. Uma das hipóteses para este comportamento foi a baixa taxa de infiltração, e uma interrupção no fornecimento de água ao sistema com cerca de 1350 ml de volume infiltrado. A interrupção no fornecimento de água ocorreu devido formação de bolhas de ar nos tubos condutores, cessando o fluxo de água para o sistema por algumas horas. Possivelmente quando houve a interrupção, a região próxima a interface estava próximo da saturação, e a água conseguiu atravessar a barreira de geotêxtil. Assim ao religar o sistema de fornecimento de água, houve uma elevação do valor da umidade no solo, mas não ocorreu o acúmulo de água esperado, devido ao rompimento da barreira representada pela camada de geotêxtil.

No gráfico da Figura 4.11 podemos observar uma queda nos valores de umidade por um breve intervalo após um volume de 1350 ml. Um intervalo de tempo depois a umidade volta a aumentar alcançando o valor anterior ao decréscimo de fluxo de água foi muito baixo.

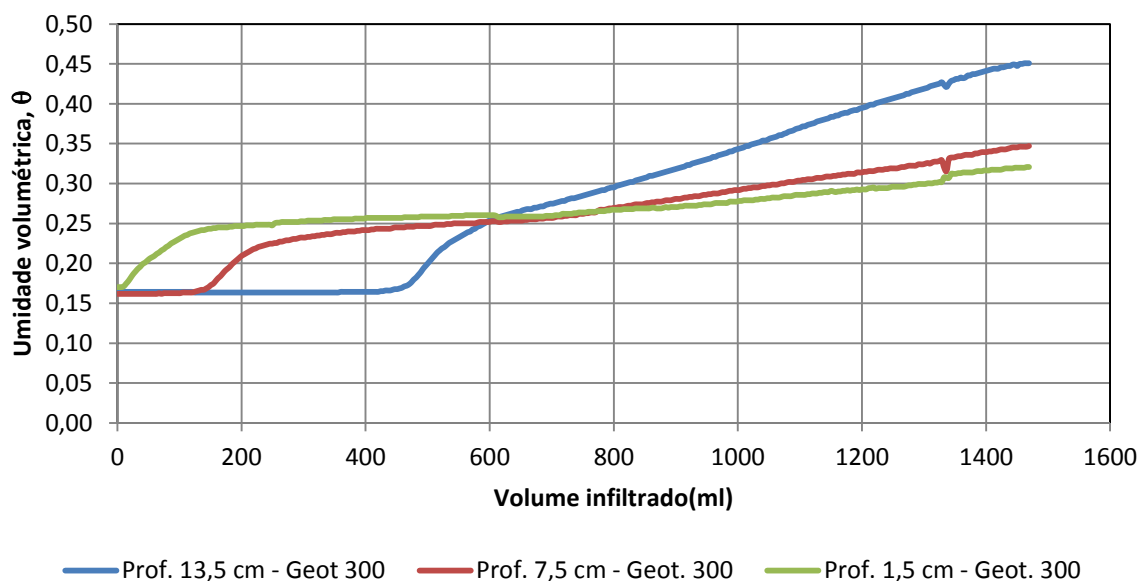


Figura 4.11 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o volume de água infiltrada - Perfil de solo RMA Tipo 2 com geotêxtil com 300 g/m².

Quando ocorreu a falha no fornecimento de água a frente de umidade já tinha passado pela camada de geotêxtil (*breakthrough*), assim, sem alimentação externa, a água começou a drenar do perfil e os sensores registraram a redução na umidade volumétrica. Ao ser corrigido o problema a umidade volumétrica voltou a subir, mas, uma vez que a barreira ao fluxo

representada pelo geotêxtil tinha sido rompida. O ensaio foi encerrado sem que fosse possível que os sensores registrassem um período de tempo com umidade constante.

O sensor instalado a 7,5 cm registra aumento da umidade volumétrica após 150 ml infiltrados, devido ao avanço da frente de molhagem. A leitura indica um crescimento constante da umidade, porém mesmo no final do ensaio não há um patamar onde o valor permaneça inalterado. O valor final de umidade registrado por este sensor ficou em torno de 0,35.

Quando a frente de molhagem alcança o sensor instalado a 13,5 cm de profundidade, após 450 ml infiltrados, a umidade volumétrica neste ponto começa a crescer com taxa aproximadamente constante. A umidade volumétrica inicial neste ponto é igual à registrada pelo sensor instalado a 7,5 cm. Para 600 ml de água ao perfil a umidade dos três sensores era a mesma, e os registros do sensor instalado a 13,5 cm indicam que os valores de umidade neste ponto, mais próximo da interface geotêxtil e solo, continuaram a aumentar. O valor final de umidade volumétrica nesta última camada ficou em torno de 0,45, indicando que o acúmulo de água levou esta camada à saturação. As leituras dos demais sensores indicam que os maiores acréscimos de umidade ficaram restritos à metade inferior do perfil de solo.

A Figura 4.12 apresenta os valores de umidade volumétrica ao longo do tempo de infiltração.

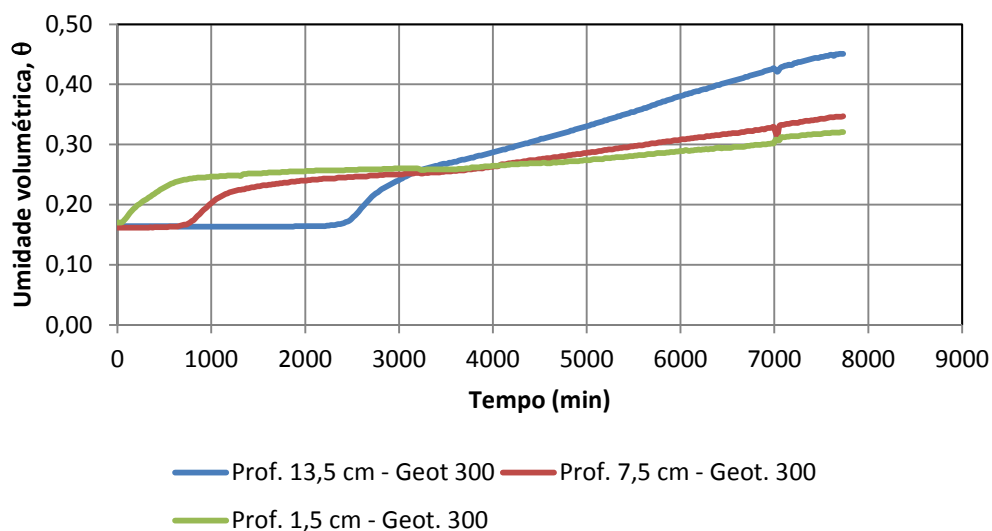


Figura 4.12 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o tempo de infiltração. Perfil de solo RMA Tipo 2 com a presença de 300 g/m².

O tempo para que a frente de umidade alcance o primeiro sensor é relativamente curto é

necessário um tempo de infiltração de cerca de 800 min para frente de umidade alcançar o sensor instalado a 7,5 cm de profundidade.

A leitura de umidade volumétrica do sensor mais próximo da interface entre solo e geotêxtil permite considerar a ocorrência do fenômeno de barreira capilar. Pela análise do gráfico da Figura 4.12 pode-se induzir que a frente de umidade rompeu a barreira do geotêxtil (*breakthrough*) com cerca de 7000 min de infiltração. A queda de umidade registrada pelos sensores a partir deste ponto ocorreu devido a drenagem de água do perfil.

Após certa de 2200 minutos de infiltração, a frente de umidade alcançou o sensor instalado a 13,5 cm de profundidade. Os três sensores indicam o mesmo valor de umidade após 53 horas de ensaio (3200 min de infiltração). A partir deste ponto há um acúmulo de umidade na parte inferior do perfil e o ensaio termina após aproximadamente 7500 min de infiltração

A Figura 4.13 apresenta os valores de umidade volumétrica registrados no ensaio, ao longo do perfil de solo.

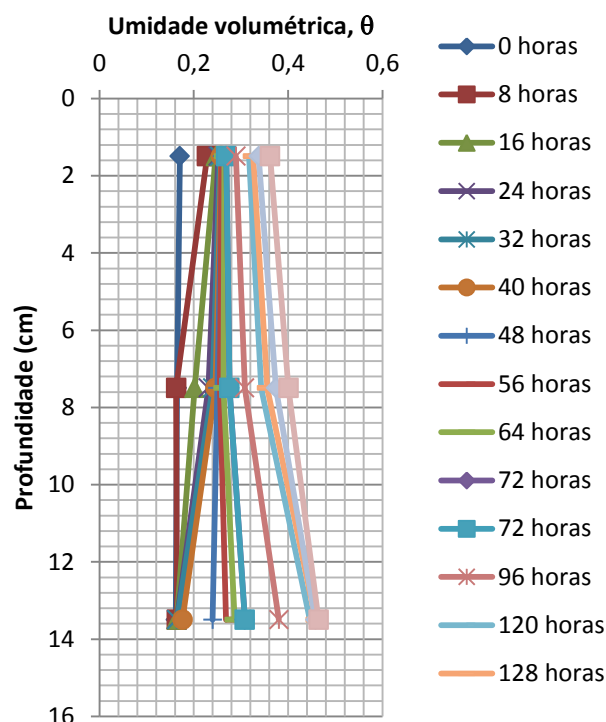


Figura 4.13 - Variação do perfil de umidade ao longo do perfil, coluna com solo RMA Tipo 2 e geotêxtil de 300 g/m².

Nas primeiras 8 horas de infiltração a frente de umidade ainda não alcançou o sensor instalado

na profundidade de 7,5 cm. Porém, com o acréscimo de água no sistema, os sensores foram registrando as mudanças de umidade, de forma que com 64 horas de infiltração os três sensores indicavam aproximadamente o mesmo valor de umidade ao longo do perfil, evidenciando que todo o perfil de solo RMA Tipo 2 já foi atravessado pela frente de umidade. A partir deste momento, observa-se que há um acréscimo de umidade volumétrica registrado pelo sensor instalado mais próximo da interface solo e geotêxtil devido ao fenômeno da barreira capilar.

4.1.4 – COLUNA COM PERFIL DE SOLO RMA TIPO 2 COM GEOTÊXTIL COM 400 g/m²

Neste ensaio foi utilizada a seguinte configuração: perfil de solo RMA Tipo 2 com espessura de 17 cm, compactado com 5 camadas 3 cm de espessura cada e uma camada de topo com 2 cm de espessura. O solo foi compactado sobre uma camada de geotêxtil de gramatura 400 g/m², que atuaria como barreira ao fluxo de água no perfil. O conjunto está apoiado sobre uma base de pedregulho com espessura de 4 cm, com função de suporte e drenagem. A Figura 4.14 apresenta o esquema de instalação dos sensores de umidade e sucção. Foram instalados 3 sensores de umidade do modelo ECH₂O EC-5, nas profundidades de 3,5 cm, 9,5 cm e 15,5 cm. Na cota de 15,5 cm foi instalado ainda um sensor de sucção do modelo MPS-2.

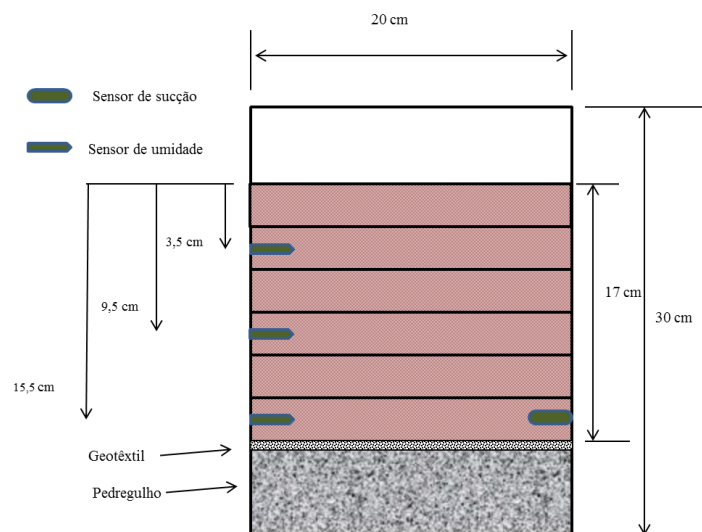


Figura 4.14 - Esquema com posição dos sensores de umidade para ensaio de infiltração em perfil composto de solo RMA Tipo 2 com presença de geotêxtil com 400 g/m² de massa por unidade de área.

Água foi adicionada ao sistema, por gotejamento, com um fluxo médio de 0,23 ml/min, equivalente a uma taxa de infiltração da ordem de $1,26 \times 10^{-7}$ m/s

A Figura 4.15 apresenta os valores de umidade volumétrica medidos pelos sensores em função do volume infiltrado de água.

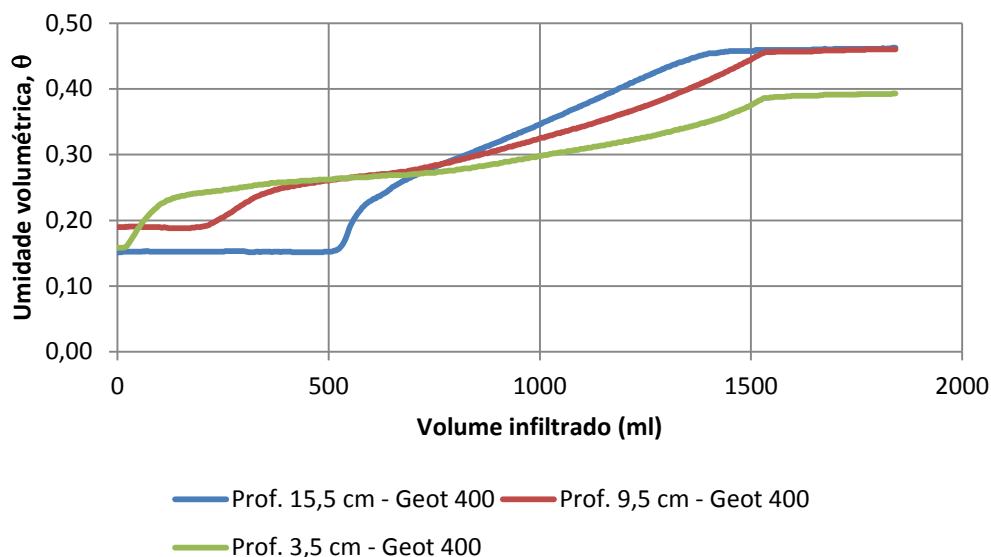


Figura 4.15 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o volume de água infiltrada - Perfil de solo RMA Tipo 2 com geotêxtil com 400 g/m².

A umidade volumétrica inicial registrada pelo sensor instalado na profundidade de 9,5 cm é maior que as registradas pelos demais sensores. Isto pode ter ocorrido durante o próprio processo de preparo do solo para compactação, porém isto não compromete a análise do comportamento do perfil como representativo de uma cobertura evapotranspirativa.

Com 50 ml de volume infiltrado o sensor instalado a 3,5 cm registra variação no valor de umidade. Com 200 ml a umidade neste ponto salta de 0,15 para 0,25 e aumenta até alcançar um valor próximo de 0,40, quando permanece inalterado, mesmo com mais água sendo adicionada ao sistema. Neste valor de 200 ml a frente de umidade alcança o sensor instalado a 9,5 cm, que registrava um valor inicial mais alto que os demais. Observa-se que com cerca de 400 ml de volume total infiltrado, a umidade neste ponto é igual a registrada pelo sensor da camada acima, em torno de 0,25.

Quando o sistema recebe cerca de 520 ml de volume de água, a frente de molhagem alcança a

sensor instalado à 15,5 cm, mais próximo da interface entre o solo e o geotêxtil. A partir deste ponto o valor da umidade volumétrica aumenta até que, com aproximadamente 720 ml de água adicionada ao sistema, a umidade alcança 0,27. Este valor é igual ao registrado pelos outros sensores. A partir deste ponto nota-se que o valor de umidade dos sensores instalados em 9,5 cm e 15,5 cm cresce até alcançar um valor estável de 0,46, enquanto o sensor instalado mais próximo à superfície mantém seu valor final em 0,40. Este comportamento indica que houve um acúmulo de água na metade inferior do perfil de solo, devido à presença do geotêxtil. O contraste entre a estrutura do solo compactado e a do geotêxtil não tecido resultou em uma retenção temporária do fluxo de água devido ao fenômeno da barreira capilar.

A Figura 4.16 apresenta os valores de umidade volumétrica em função do tempo de infiltração. A frente de molhagem levou cerca de 2100 min para alcançar o sensor instalado na camada próxima da interface solo e geotêxtil. Observa-se ainda que o sensor instalado a 15,5 cm alcançou a umidade volumétrica máxima do ensaio, cerca de 0,46, antes que o sensor instalado acima, a 9,5 cm.

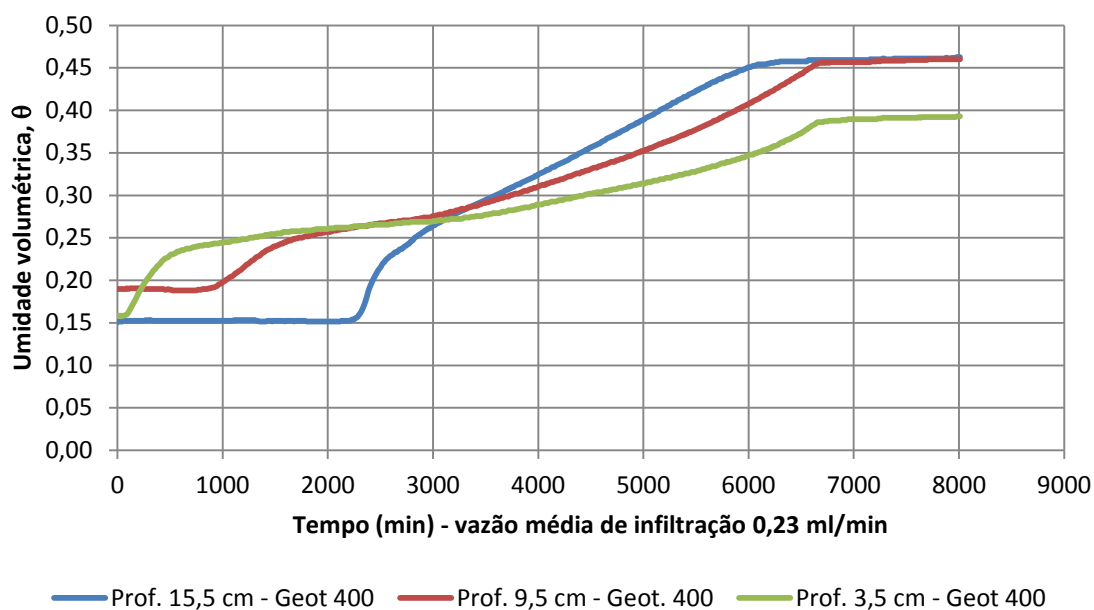


Figura 4.16 - Variação da umidade volumétrica com o tempo de infiltração. Perfil de solo RMA Tipo 2 e geotêxtil com gramatura de 400 g/m².

Este comportamento indica que, além do ponto onde os três sensores registram valor igual de umidade volumétrica, a variação registrada pelos sensores deve-se ao acúmulo de umidade a

partir do fundo do perfil. Este comportamento indica a retenção da frente de molhagem pelo efeito de barreira capilar. Indica ainda que na umidade de 0,46 a metade inferior do solo estava próxima da saturação e a frente de molhagem rompeu a camada de geotêxtil (*breakthrough*). A partir deste ponto toda água adicionada ao sistema saia pela base de acrílico perfurada.

A Figura 4.17 representa a variação da umidade volumétrica ao longo da profundidade do perfil de solo, considerando o tempo de infiltração. As leituras registradas pelos sensores indicam que, com 56 horas de infiltração, a umidade volumétrica é a mesma ao longo da camada de solo. A partir deste ponto observamos um acúmulo de umidade percebida pelo sensor mais próximo da interface solo e geotêxtil.

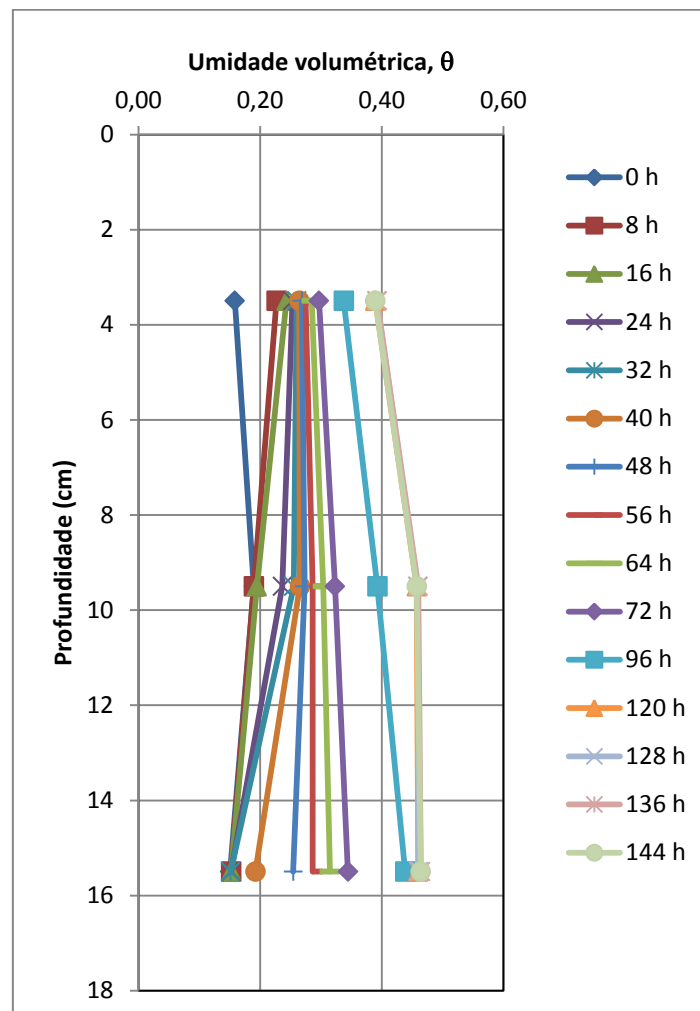


Figura 4.17 -- Variação do perfil de umidade ao longo do perfil, coluna com solo RMA Tipo 2 e geotêxtil de 400 g/m².

A partir de 120 horas de infiltração, os valores de umidade volumétrica na metade inferior da camada de solo são iguais, devido ao acúmulo de umidade nesta região como efeito da barreira capilar.

A Figura 4.18 apresenta os valores de sucção e umidade volumétrica no sensor instalado a 15,5 cm de profundidade no conjunto solo RMA Tipo 2 e geotêxtil com 400 g/m² de massa por unidade de área. Os valores de sucção foram colocados em MPa para melhor visualização dos valores iniciais.

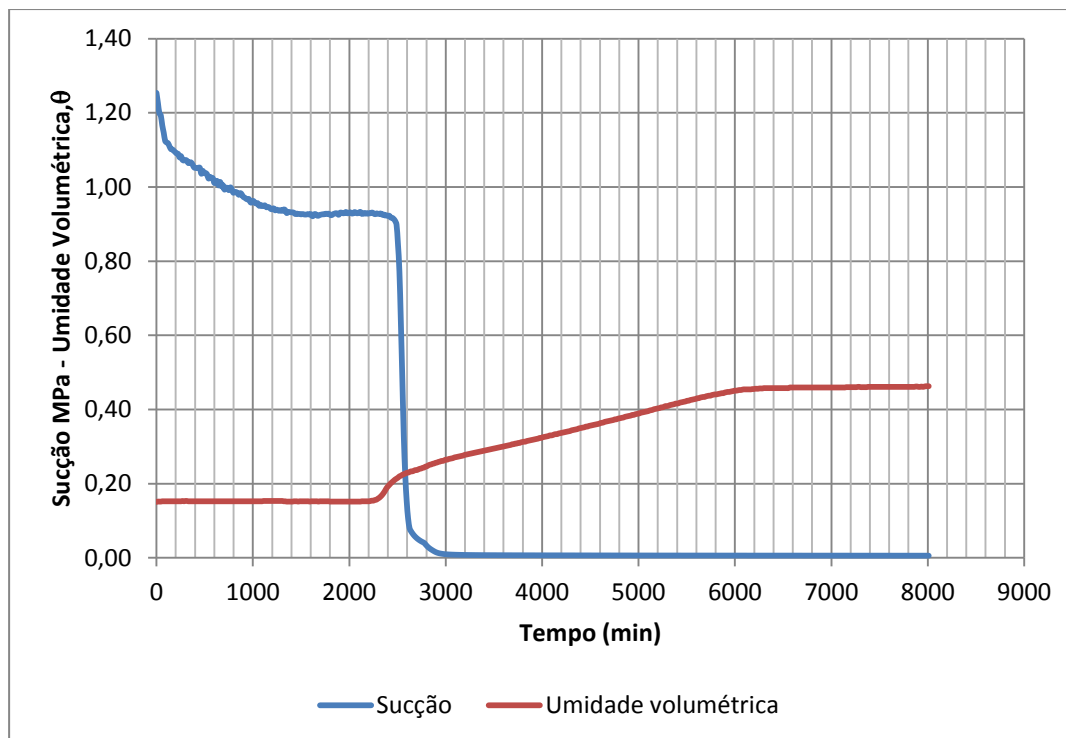


Figura 4.18 - Valores de sucção e umidade volumétrica em relação ao tempo de infiltração no perfil de solo RMA Tipo 2 e geotêxtil com 400 g/m² a uma profundidade de 15,5 cm.

Com cerca de 2500 min de infiltração, a sucção medida pelo sensor instalado a 15,5 cm sofreu decréscimo, indicando a presença da frente de molhagem. Este comportamento está coerente com o observado anteriormente. Uma vez que a frente de molhagem alcançou o geotêxtil com cerca de 3000 min de infiltração, a sucção ficou abaixo de 10 kPa (0,001 MPa). A partir deste ponto, o acúmulo de umidade devido ao efeito de barreira capilar deixa o material próximo da saturação e o valor da sucção fica próximo de zero.

A Figura 4.19 apresenta um gráfico comparativo da variação da umidade volumétrica em

função do volume de água infiltrado no sistema, para as três configurações de cobertura utilizando solo e geotêxtil. São comparados os valores registrados pelos sensores nas colunas de solo RMA Tipo 2 compactado sem a presença de geotêxtil e com a presença dos geotêxteis com massas por unidade de área iguais a 200 g/m²; 300 g/m² e 400 g/m².

O gráfico da Figura 4.19 evidencia a ação do geotêxtil na retenção de água no perfil de solo compactado. Para o arranjo sem a presença do geotêxtil, tem-se um valor de umidade volumétrica final menor, por volta de 0,43, quando então a água sai pela base do perfil. Além disso, observa-se que a água sai pela base do perfil de solo sem geotêxtil para um valor bem menor de água infiltrada (cerca de 840 ml).

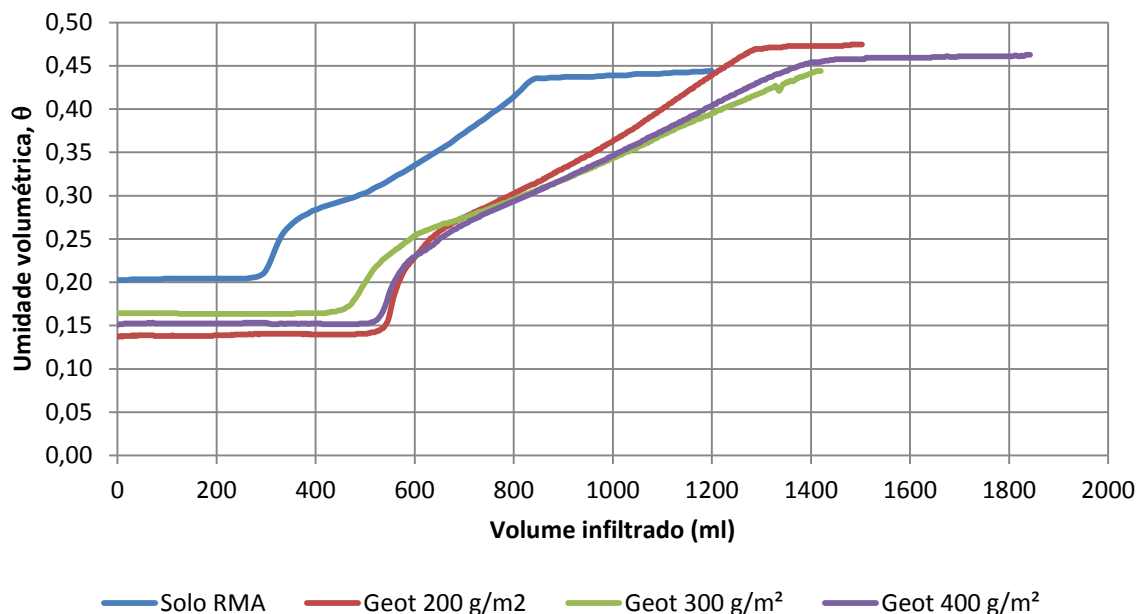


Figura 4.19 - Comparação entre variações da umidade volumétrica próximo da interface solo-geotêxtil para geotêxteis com 200 g/m², 300 g/m² e 400 g/m² e perfil de solo RMA Tipo 2 sem a presença de geotêxtil.

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. Este efeito é útil em um sistema de cobertura evapotranspirativa, onde é se deve acumular água na camada de cobertura para posterior eliminação.

4.1.5– COLUNA COM PERFIL DE SOLO RMA TIPO 2 E AREIA MONTEREY Nº 30 COM PRESENÇA DE GEOTÊXTEL NÃO TECIDO DE 200 g/m².

Foi realizado um ensaio de coluna utilizando um perfil composto por solo RMA Tipo 2, compactado, com a presença de geotêxtil não tecido com gramatura de 200 g/m² e utilizando como camada de drenagem e suporte areia *Monterey* nº30. A utilização de areia como camada de suporte permitiu instalar um sensor de umidade abaixo da camada de geotêxtil.

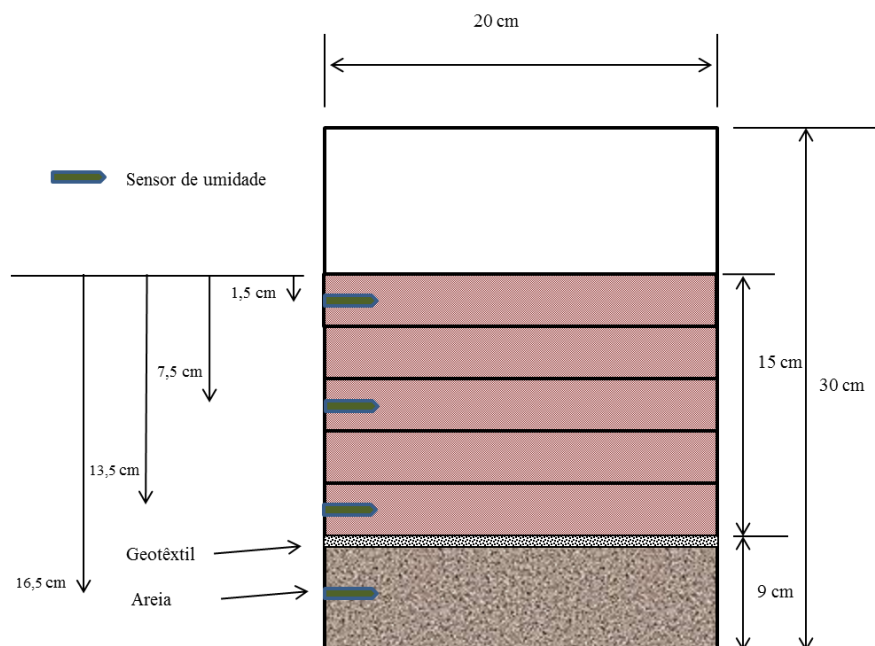


Figura 4.20 - Posição dos sensores de umidade para o ensaio de infiltração em perfil composto de solo RMA Tipo 2 com presença de geotêxtil de 200 g/m² e areia *Monterey* nº30.

O perfil de solo RMA Tipo 2 foi compactado em 5 camadas, com 3 cm de espessura cada,

resultando em um perfil de solo de 15 cm. No solo foram instalados sensores ECH2O EC-5 instalados nas profundidades de 1,5 cm; 7,5 cm e 13,5 cm. A areia *Monterey* n° 30 foi compactada em três camadas, com 3 cm de espessura cada, resultando em um perfil com 9 cm de espessura. A Figura 4.20 ilustra o perfil final e a instalação dos sensores.

A água foi adicionada ao sistema por gotejamento em uma vazão média de 0,15 ml/min, equivalente a uma taxa de infiltração de $8,22 \times 10^{-8}$ m/s.

A Figura 4.21 apresenta os dados de umidade volumétrica em relação ao volume de água infiltrada no sistema.

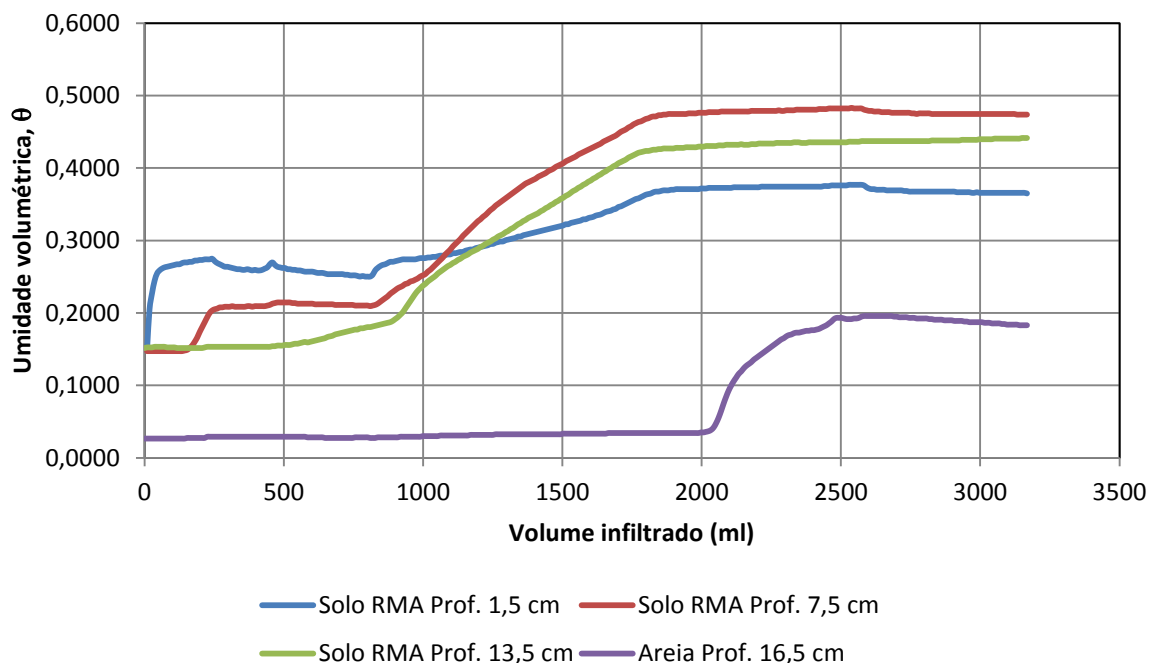


Figura 4.21 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o volume infiltrado. Perfil de solo RMA Tipo 2 com a presença de geotêxtil de 200 g/m² e camada de apoio em areia *Monterey* n°30.

A partir de 1100 ml de volume de água adicionada ao perfil de solo, os sensores colocados ao longo do perfil apresentam o mesmo valor de umidade, indicando que a frente de molhagem chegou ao geotêxtil. Pelo efeito da barreira capilar, a partir deste ponto os sensores instalados a 7,5 cm e 13,5 cm registram o aumento de umidade por acúmulo de água.

A partir de aproximadamente 1900 ml de água infiltrada, a leitura dos sensores ao longo do

perfil de solo mostram um valor constante, mesmo com o sistema de infiltração acrescentando água no perfil de solo. Isto significa que a frente de molhagem atravessou o geotêxtil e entrou na camada inferior de areia (*breakthrough*). O sensor de umidade instalado na camada de areia, abaixo do geotêxtil, registra a variação de umidade após 2000 ml de volume de água infiltrado no sistema. O registro deste sensor confirma que a quebra da barreira pode ser confirmada quando os sensores instalados no solo registram um valor constante.

A Figura 4.22 apresenta os valores de umidade volumétrica em função do tempo de infiltração. Após cerca de 6000 min, aproximadamente 100 horas, a frente de molhagem aciona o sensor de umidade localizado na profundidade de 13,5 cm, mais próximo da interface entre o solo e o geotêxtil.

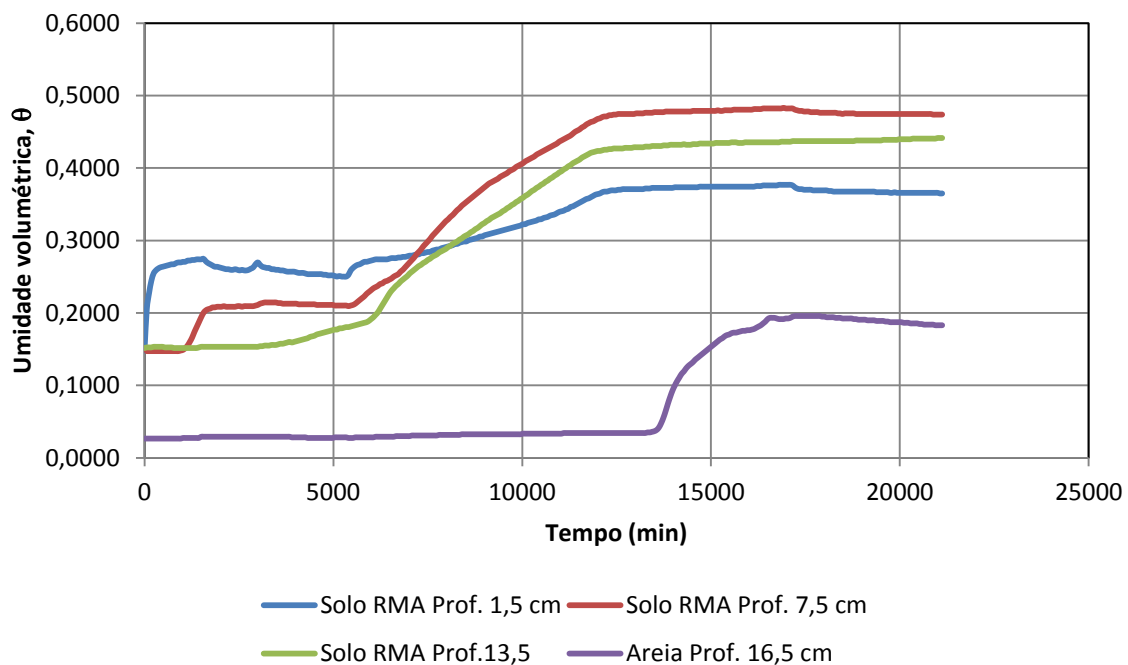


Figura 4.22 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o tempo de infiltração. Perfil de solo RMA Tipo 2 com a presença de geotêxtil com 200 g/m² e camada de apoio em areia *Monterey* nº30, sem presença de geotêxtil.

O monitoramento das umidades volumétricas nos pontos localizados a 7,5 cm e 13,5 cm mostrou comportamento diferente dos ensaios anteriores. O valor de umidade final no sensor instalado em 7,7 cm registrou valor maior que o localizado no fundo da amostra. Uma das explicações possíveis foi um acúmulo de umidade no meio do perfil de solo por uma migração descendente da água das primeiras camadas do perfil para esta região. Isto pode ter

ocorrido porque houve uma interrupção no fornecimento de água para o sistema, por defeito nos tubos que conduziam água na mini-bomba peristáltica. Devido a geração de ar nestes tubos, houve uma interrupção de água por cerca de 24 horas (o defeito ocorreu entre os dias 22 e 23 de dezembro de 2013).

4.1.6– COLUNA COM PERFIL DE SOLO RMA TIPO 2 E AREIA *MONTEREY* Nº 30 SEM PRESENÇA DE GEOTÊXTIL.

Foi realizado um ensaio de coluna utilizando solo RMA Tipo 2 e areia *Monterey* nº30 sem a presença de geotêxtil, para observar se ocorreria o fenômeno de barreira capilar pelo contraste entre o tamanho dos poros do solo e da areia. Neste ensaio foi compactado um perfil de solo RMA Tipo 2 em 5 camadas, de 3 cm cada uma, com espessura final de 15 cm. Este perfil de solo foi compactado sobre um perfil de areia com 9 cm de espessura, compactado em 3 camadas de 3 cm cada. A água foi adicionada ao sistema por gotejamento com uma vazão média de 0,27 ml/min, equivalente a $1,48 \times 10^{-7}$ m/s de taxa de infiltração.

A Figura 4.23 apresenta o esquema de instalação dos sensores durante o ensaio:

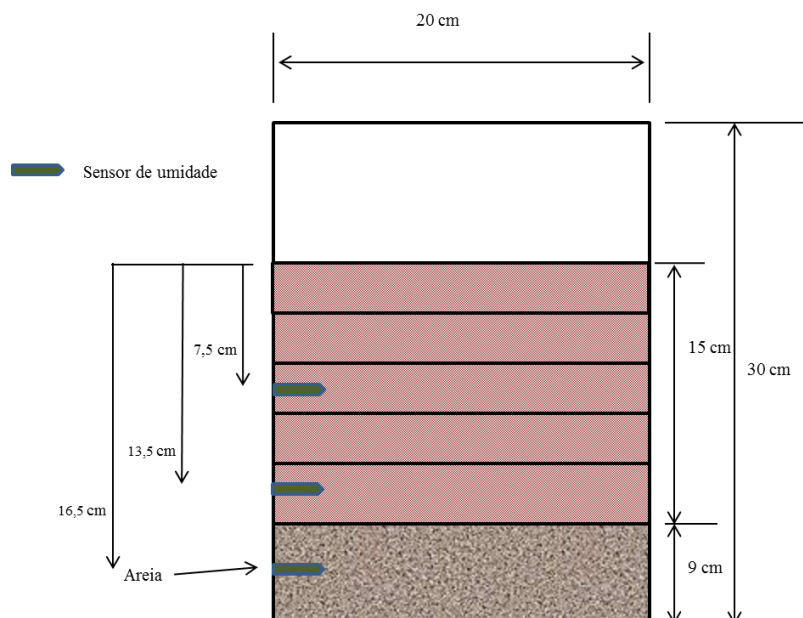


Figura 4.23 - Posição dos sensores de umidade para ensaio de infiltração em perfil composto de solo RMA Tipo 2 e areia *Monterey* nº30.

Foram utilizados para o monitoramento 3 sensores de umidade do modelo ECH₂O EC-5, instalados a 7,5 cm, 13,5 cm e 16,5 cm de profundidade. O sensor instalado a 16,5 cm de profundidade estava na camada de areia de *Monterey* nº30. Por dispormos de apenas três sensores de umidade para monitorar o ensaio, utilizamos dois no perfil de solo e um sensor instalado na areia, logo abaixo do geotêxtil.

A Figura 4.24 apresenta os resultados obtidos da medição da umidade volumétrica em relação ao tempo de infiltração.

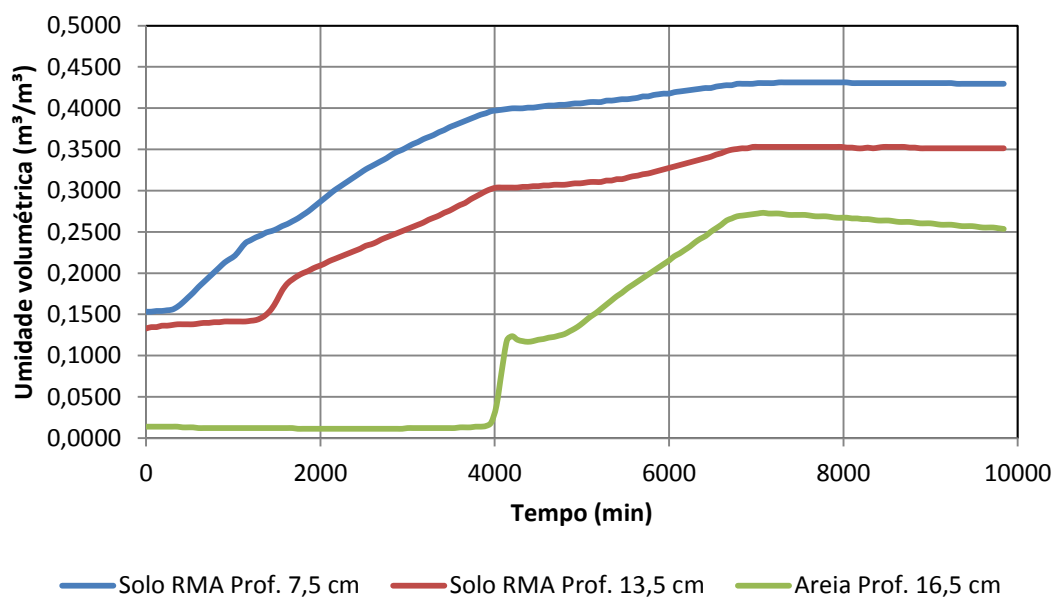


Figura 4.24 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o tempo de infiltração - Perfil de solo RMA Tipo 2 e areia *Monterey* nº30.

Os valores registrados pelos sensores indicam que houve um acréscimo de umidade à medida que mais água foi infiltrada no sistema, como esperado. Porém, os valores de umidade do sensor instalado a 13,5 cm, próximo da interface solo e areia, não demonstraram que houve acúmulo de umidade nas camadas inferiores do perfil.

O contraste entre a areia *Monterey* nº30 e o solo compactado não foi suficiente para a formação de barreira capilar. Isto aponta para a conclusão que o acúmulo de água registrada no solo quando presente o geotêxtil não tecido, é devido ao contraste dos poros do solo com o geossintético. A areia utilizada não pareceu influenciar o acúmulo de umidade

A Figura 4.25 traz o gráfico da variação da umidade volumétrica ao longo do perfil de solo, considerando o tempo de infiltração.

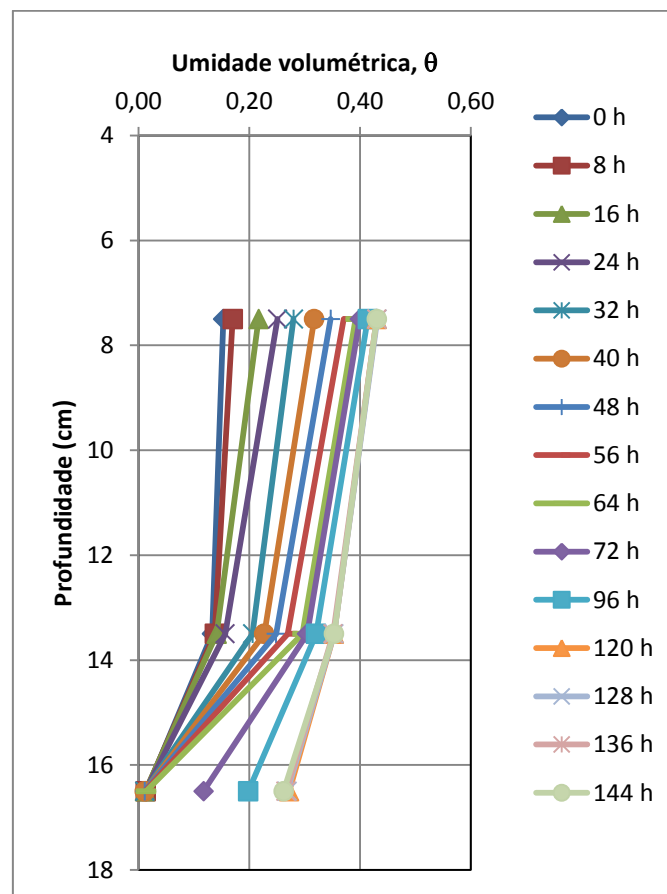


Figura 4.25 - Variação do perfil de umidade ao longo do perfil, coluna com solo RMA Tipo 2 e areia Monterey n°30 sem a presença de geotêxtil.

Inicialmente a umidade volumétrica da areia é consideravelmente menor que a da camada de solo. Esta diferença ocorre porque a areia foi compactada a uma umidade inicial de 3%. Com o acréscimo de água no sistema os sensores instalados na camada de solo registram o avanço da frente de molhagem. Até um tempo de infiltração de 64 horas, não ocorreu variação de umidade na camada de areia. Com 72 horas o sensor instalado a 16,5 cm registra o avanço da frente de molhagem.

Os dados mostram que não houve acúmulo de água na camada de solo, mesmo com o contraste da camada de areia. Não ocorreu o fenômeno de barreira capilar. Quando a umidade volumétrica na camada de areia alcança 26% não há mais variação de umidade ao longo do perfil, indicando que, a partir deste ponto, toda água adicionada ao sistema era eliminada através da placa de acrílico perfurada sobre a qual estava assentado o perfil.

4.1.7– COLUNA COM PERFIL DE SOLO RMA TIPO 2 E CAMADA DE PEDREGULHO.

Foi realizado ainda um ensaio de infiltração em coluna utilizando solo RMA Tipo 2 com uma camada de pedregulho como material granular. Para este ensaio não foi inserido geotêxtil não tecido na interface entre o solo e o material granular. O perfil de solo foi compactado em 5 camadas de 3 cm cada um, com uma espessura total de 15 cm. O perfil de solo foi executado sobre uma camada de pedregulho com espessura de 9 cm. A água foi inserida no sistema por gotejamento com uma taxa média de 0,21 ml/min, equivalente a $1,15 \times 10^{-7}$ m/s.

O avanço da frente de molhagem foi monitorado utilizando sensores do tipo ECH₂O instalados a 1,5 cm; 7,5 cm e 13,5 cm de profundidade. Não foi possível monitorar a umidade na camada de pedregulho pelo risco de danificar os sensores. A Figura 4.26 ilustra a posição dos sensores durante a realização do ensaio.

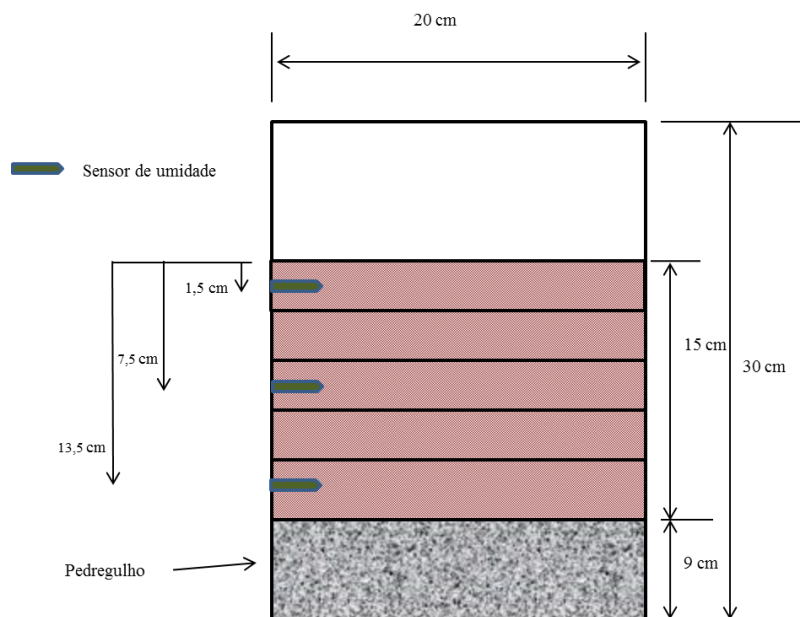


Figura 4.26 - Posição dos sensores de umidade para ensaio de infiltração em perfil composto de solo RMA Tipo 2 e pedregulho.

A Figura 4.27 traz o resultado do monitoramento do avanço da frente de umidade durante o ensaio de infiltração em função do tempo de infiltração. O valor de umidade inicial registrado pelos sensores apresenta alguma variação entre as camadas. O valor de umidade inicial na

camada de solo mais próxima a interface com o geotêxtil não tecido está em torno de 16% enquanto as umidades iniciais dos demais sensores estão no mesmo valor, com cerca de 17,5%. A progressão da frente de umidade permite observar o comportamento hidráulico do perfil com o avanço da frente de umidade.

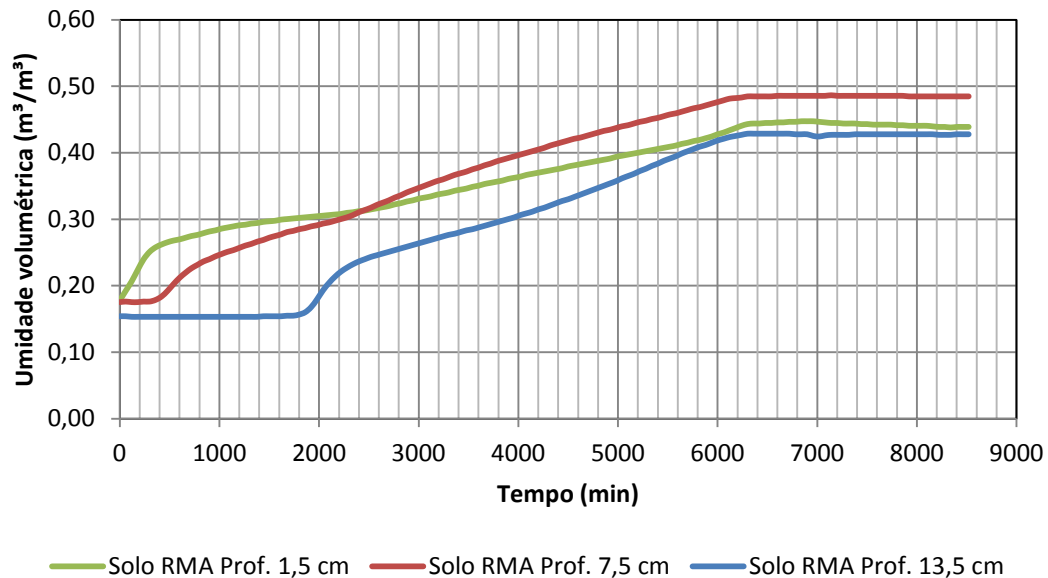


Figura 4.27 - Gráfico de variação da umidade volumétrica com o tempo de infiltração - Perfil de solo RMA Tipo 2 e camada de pedregulho sem a presença de geotêxtil.

Os valores de umidade nos pontos monitorados crescem continuamente, sendo que o sensor instalado no meio da amostra de solo apresenta umidade volumétrica maior que os demais ao final do ensaio. Percebe-se que não há uma elevação da umidade volumétrica significativa no ponto mais próximo da interface entre solo e pedregulho que seja suficiente para afirmar que houve a formação da barreira capilar.

Considerando que o solo foi compactado diretamente sobre a camada de pedregulho, parte dos grãos de solo da camada inferior do perfil penetrou nos vazios do pedregulho. Este fenômeno pode ter resultado em uma fina camada resistiva a água, mas que não foi suficiente para representar uma barreira ao fluxo descendente. A Figura 4.28 detalha a interface entre o solo compactado e a camada de pedregulho. Podemos observar que há uma penetração do solo devido a energia aplicada na compactação. Possivelmente a entrada do solo nos vazios da camada de pedregulho na interface das camadas contribuiu para que não fosse observado o comportamento de barreira capilar.

Com aproximadamente 6100 min de infiltração os valores de umidade registrados pelos sensores não apresentam mais variação, indicando que a frente de molhagem havia alcançado a camada de pedregulho.



Figura 4.28 - Detalhe da interface entre solo compactado e pedregulho no ensaio de infiltração sem presença de geotêxtil.

A Figura 4.29 representa a variação da umidade volumétrica ao longo do perfil de solo.

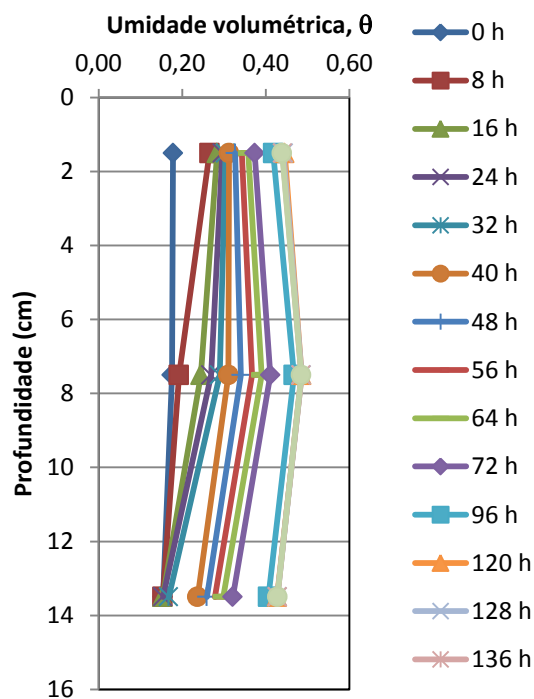


Figura 4.29 - Variação do perfil de umidade ao longo do perfil, coluna com solo RMA e pedregulho, sem a presença de geossintético.

Não foi possível instalar um sensor de umidade na camada de pedregulho. Podemos observar que o aumento da umidade volumétrica, causada pela adição de água ao sistema, é registrado por todos os sensores com o tempo de infiltração. A umidade volumétrica registrada nos sensores instalados a 1,5 cm e 7,5 cm de profundidade no perfil de solo registram acréscimo e a umidade volumétrica final no sensor de 7,5 cm é um pouco maior que nos demais.

Observamos um aumento da umidade no ponto mais próximo da interface entre solo e pedregulho, mas não suficiente para indicar que houve um acúmulo de água considerável na metade inferior da camada de solo. Este comportamento não indica a ocorrência de barreira capilar, quando da ausência da camada de geotêxtil entre o solo compactado e o pedregulho. Os resultados parecem indicar que a camada de pedregulho teve pouca influência na formação de barreira capilar, no caso dos perfis de cobertura compostos de solo, geotêxtil e pedregulho. Porém, como já citado, é importante destacar que a intrusão do solo nos espaços da camada de pedregulho na interface entre as camadas, pode influenciar na comparação entre este ensaio e os ensaios de infiltração realizados com um geotêxtil instalado entre a camada de pedregulho e a camada de solo.

4.2 – ENSAIOS EM COLUNA SUSPensa (HANGING COLUMN TEST) PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DE GEOTÊXTEIS.

Os ensaios de infiltração realizados em colunas com diferentes configurações de perfil indicaram que a presença do geotêxtil como parte integrante do sistema de cobertura potencializa o acúmulo de água no sistema, mostrando o funcionamento do conjunto como uma cobertura evapotranspirativa graças ao fenômeno da barreira capilar. Para melhor entendimento do fenômeno é fundamental compreender o comportamento hidráulico não saturado do geotêxtil. Neste sentido, 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) propôs 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.

O equipamento utilizado nesta pesquisa foi descrito na seção 3.2.2, do Capítulo 3 “Materiais e Métodos”. Este equipamento foi 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 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 gramaturas de 200 g/m²; 300 g/m² e 400 g/m². Estes materiais foram enviados pela Universidade de Brasília para que fossem utilizados durante o período de trabalho na Universidade do Texas em Austin.

4.2.1 –CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DE GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS.

A Figura 4.30 apresenta o resultado do ensaio de coluna suspensa para o geotêxtil não tecido com massa por unidade de área de 200 g/m².

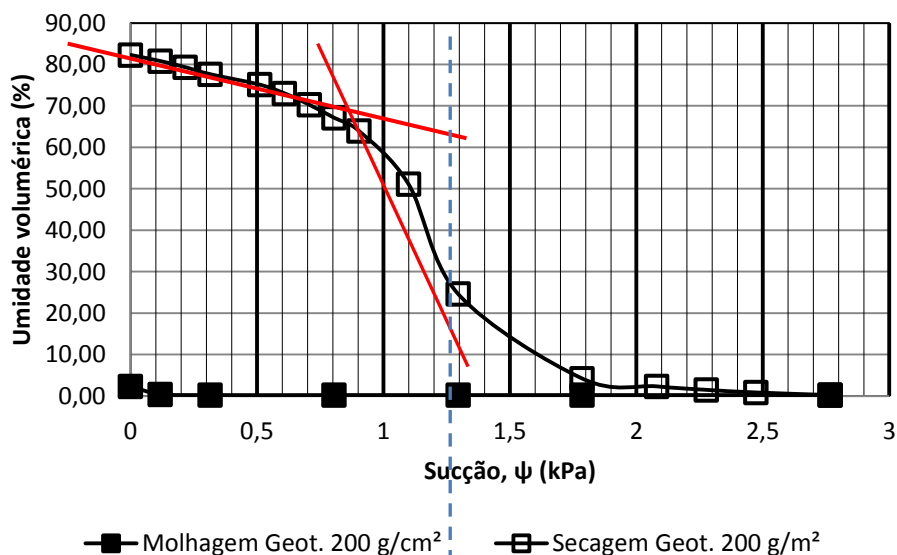


Figura 4.30 - Curva de retenção de água para geotêxtil não tecido com massa por unidade de área de 200 g/m².

A curva característica está desenhada em termos de umidade volumétrica e sucção do material. A amostra foi ensaiada inicialmente próxima da saturação, com umidade volumétrica estimada em 82,29%, e a trajetória de secagem foi obtida impondo gradualmente

valores maiores de sucção, elevando a câmara onde estava a amostra de geotêxtil. A cada acréscimo de sucção era aguardado um período entre 24 e 48 horas para que o sistema alcançasse o equilíbrio, e a umidade volumétrica era calculada a partir do peso da massa da amostra de geotêxtil úmida em cada estágio.

Para os estágios iniciais de sucção já há alguma redução da umidade volumétrica, porém a curva de secagem fica mais inclinada a partir de 0,3 kPa. Utilizando procedimento semelhante ao apresentado por Bouazza *et al.* (2006), foram estimados graficamente dois valores de sucção importantes para análise do comportamento hidráulico. O primeiro refere-se ao valor de entrada de ar (Ψ_{aev}) correspondente a sucção no ponto da curva onde começa a drenagem do material. Os vazios preenchidos inicialmente por água são agora preenchidos por ar, porque as partículas de água começam a drenar para fora do material. O segundo é o valor de entrada de água (Ψ_{wev}), relativo ao nível de sucção onde a água começa a ser absorvida pelos poros do geotêxtil. Considerando a forma da curva de molhagem na Figura 4.30, tem-se que o valor de entrada de água, Ψ_{wev} , é de aproximadamente 0,1 kPa, ou seja, o material absorve água em valores de sucção muito próximos de zero.

A Figura 4.31 mostra a curva de retenção de água da amostra de geotêxtil não tecido de 200 g/m² com os valores de sucção em função do grau de saturação.

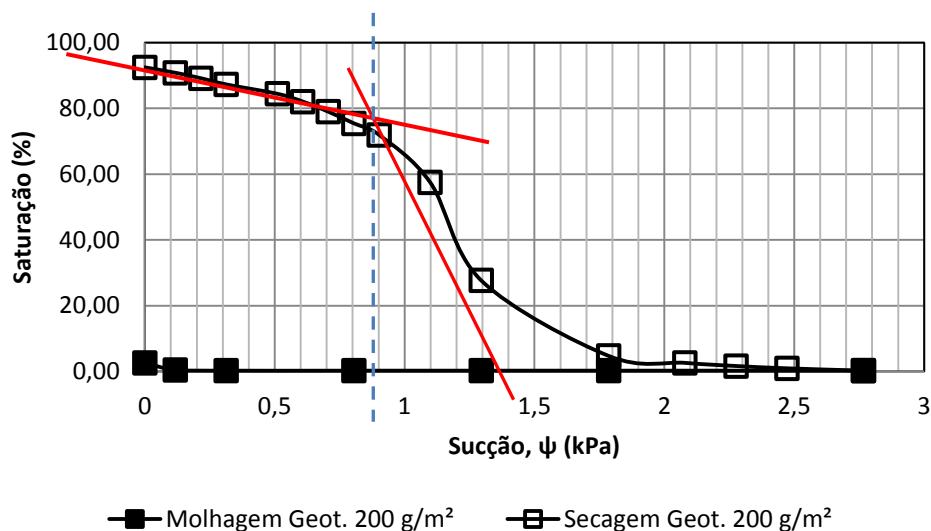


Figura 4.31 - Curva de retenção de água para geotêxtil não tecido de 200 g/m² considerando o grau de saturação da amostra.

A amostra está inicialmente com grau de saturação próximo de 93%. A curva de secagem indica que a amostra alcança uma umidade residual em um valor de sucção próximo de 2,8 kPa.

Observando as trajetórias de secagem e de molhagem da curva de retenção de água, tem-se uma histerese considerável entre as duas trajetórias. Na trajetória de secagem pode-se observar claramente que a amostra perde água a medida que a sucção cresce, e, em um valor de sucção próximo de 1,8 kPa já se tem um valor de umidade próximo do residual. A partir deste ponto a drenagem por acréscimo de sucção é mínima porque a amostra perdeu praticamente todo seu volume de água.

O valor de entrada de água da amostra ocorre por volta de 0,1 kPa. Considerando o geotêxtil em contato com um solo em um sistema de cobertura, como os simulados pelos ensaios de infiltração em coluna, isto significa que a água do solo não irá migrar para o geotêxtil a não ser que o solo esteja próximo da saturação, com sucção próxima de zero.

A curva de molhagem indica que, com pequenas variações de sucção, menores que 3 kPa, o geotêxtil pode drenar e permanecer apenas com uma umidade residual. Isto indica que, no funcionamento de uma barreira capilar, o geotêxtil pode recuperar sua capacidade de resistir à passagem de água quando o solo iniciar sua perda de umidade por mecanismos de evapotranspiração.

A Figura 4.32 apresenta a curva de retenção de água obtida pelo ensaio de coluna suspensa, para o geotêxtil com gramatura de 300 g/m², em função da umidade volumétrica. A amostra começou a ser ensaiada em uma umidade volumétrica de 90%, com o espécime saturado. A curva de secagem é obtida aumentando gradativamente os valores de sucção. Utilizando o método gráfico, a exemplo de Bouazza *et al.* (2006) encontra-se um valor de entrada de ar (Ψ_{aev}) igual a 0,8 kPa para o geotêxtil com massa por unidade de área de 300 g/m².

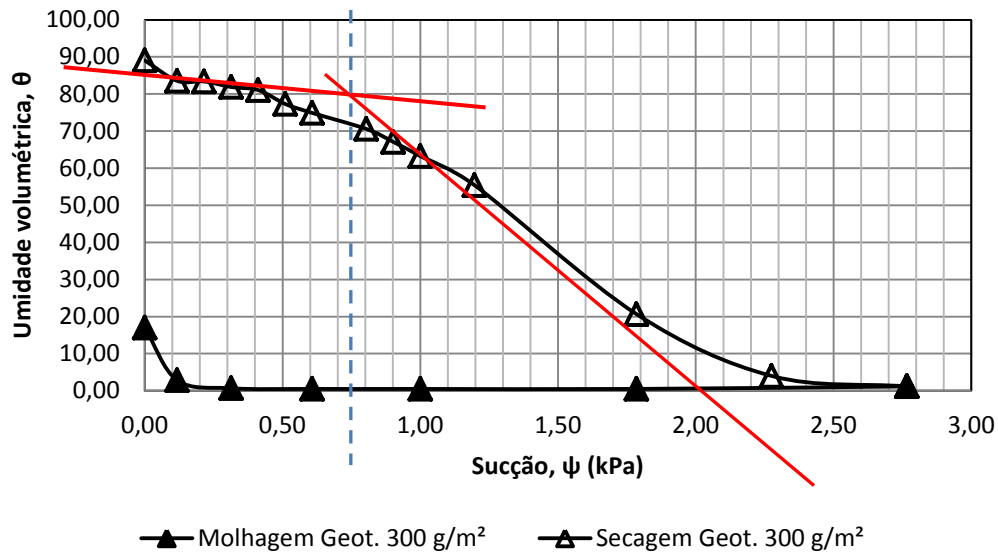


Figura 4.32 - Curva de retenção de água para geotêxtil não tecido de 300 g/m² considerando a umidade volumétrica da amostra.

A Figura 4.33 apresenta a curva de retenção de água do geotêxtil de 300 g/m² em função do grau de saturação. A amostra começa o ensaio com saturação a 100%. A curva de secagem apresenta uma inclinação mais suave que a observada para o geotêxtil de 200 g/m², possivelmente por dispor de mais poros para retenção de água na sua estrutura.

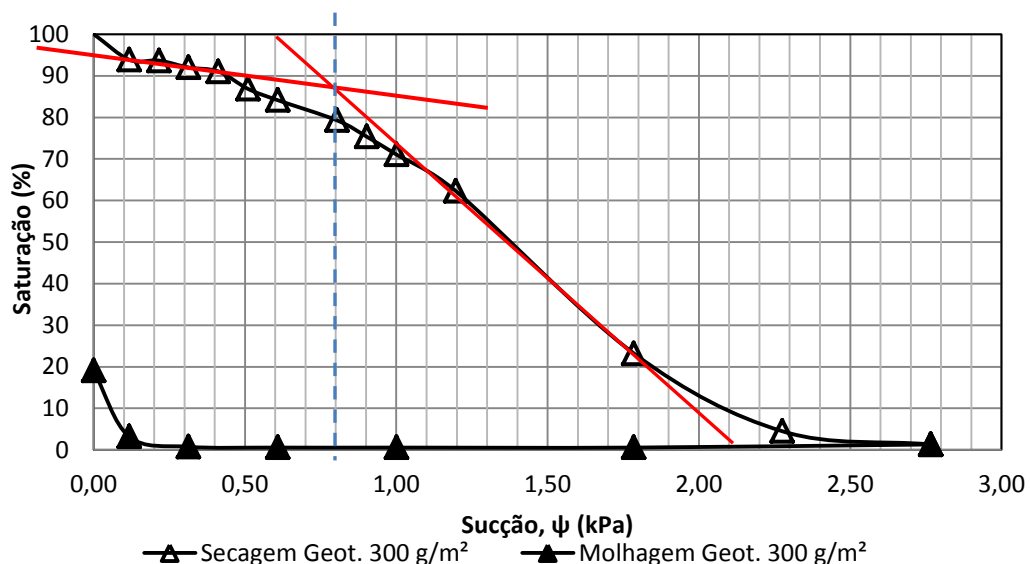


Figura 4.33 - Curva de retenção de água para geotêxtil não tecido de 300 g/m² considerando a saturação da amostra.

A trajetória de molhagem, a exemplo do geotêxtil de 200 g/m², apresenta um valor de entrada de água Ψ_{wev} em torno de 0,2 kPa, indicando mais uma vez o comportamento hidrofóbico do material. A água só começa a entrar no material para valores de sucção próximos a zero. O comportamento apresentado por este material na curva de retenção de água está de acordo com o comportamento observado nos ensaios de infiltração com o este material como barreira ao fluxo de água. A característica hidrofóbica do material colabora para a formação da barreira capilar nos ensaios de coluna.

A Figura 4.34 apresenta o resultado da curva de retenção para o geotêxtil não tecido com gramatura de 400 g/m² em função da umidade volumétrica. O ensaio iniciou com uma umidade volumétrica próxima a 90%. Observa-se que a curva de secagem tem um declínio suave até o valor próximo de entrada de ar (1,3 kPa), quando há um maior decréscimo da umidade volumétrica com o aumento da sucção.

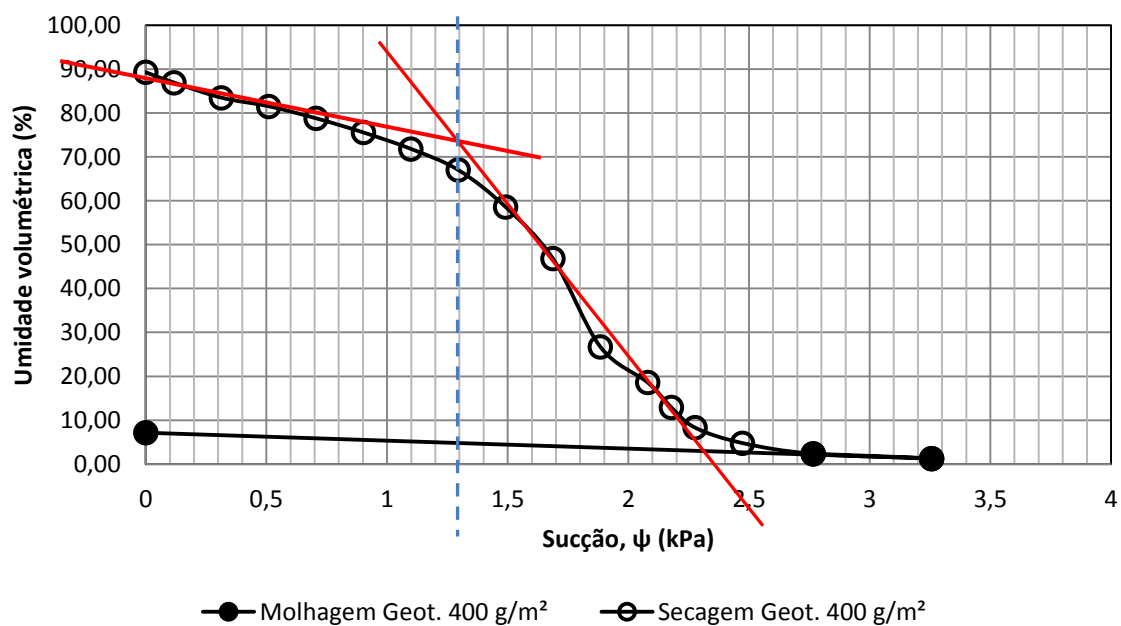


Figura 4.34 - Curva de retenção de água para geotêxtil não tecido de 400 g/m² considerando a umidade volumétrica da amostra.

Aplicando o método gráfico, tem-se que o valor de entrada de ar da amostra, Ψ_{aev} , é aproximadamente igual a 1,3 kPa. A partir deste ponto tem-se uma maior saída de água para pequenos acréscimos de sucção. A amostra perdeu umidade durante o teste até seu valor residual, por volta de 3,3 kPa.

Os últimos estágios de sucção do ensaio, referentes à curva de secagem, reforçam as características hidrofóbicas da amostra de geotêxtil não tecido, podendo-se estimar o valor de entrada de água Ψ_{wev} em torno de 0,2 kPa. Este comportamento parece indicar que o geotêxtil com gramatura de 400 g/m² tem maior capacidade de retenção de água, por dispor de maior volume de poros para manter a umidade volumétrica, tendo uma espessura estimada em 4 mm.

A Figura 4.35 apresenta a curva de retenção de água do geotêxtil não tecido de 400 g/m² em função do grau de saturação. O ensaio iniciou com a amostra saturada. Não foi possível definir um estágio inicial onde a mudança da sucção não resultasse em alteração da umidade volumétrica, observa que a drenagem da amostra é mais intensa quando o sistema alcança a sucção equivalente ao valor de entrada de ar.

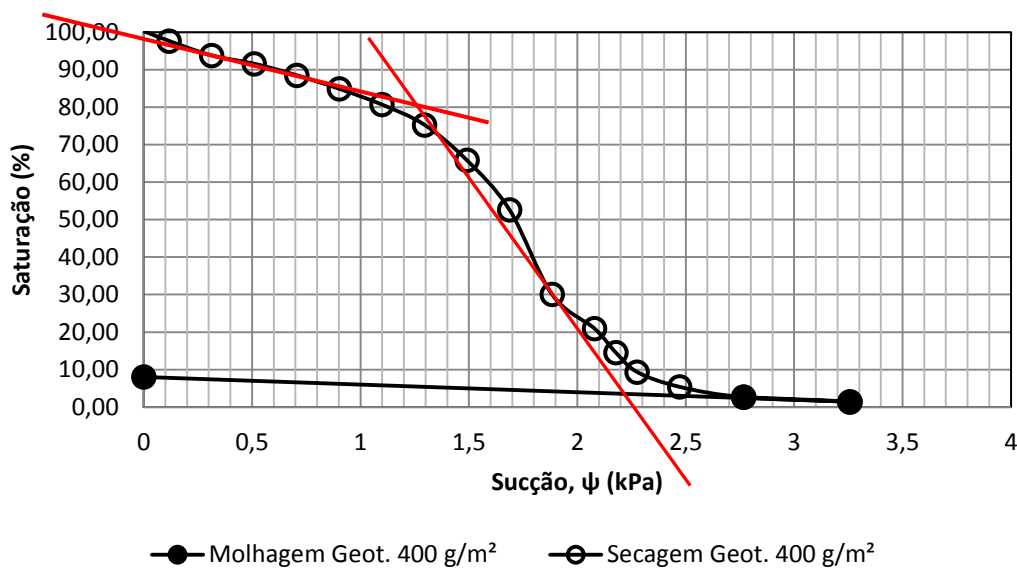


Figura 4.35 - Curva de retenção de água para geotêxtil não tecido de 400 g/m² considerando a saturação da amostra.

A Figura 4.36 compara as curvas de retenção de água dos três geotêxteis ensaiados considerando apenas a trajetória de secagem, relacionando os valores de sucção com os valores de umidade volumétrica. A curva comparativa é importante para notarmos a diferença no comportamento de retenção de umidade para cada geotêxtil ensaiado.

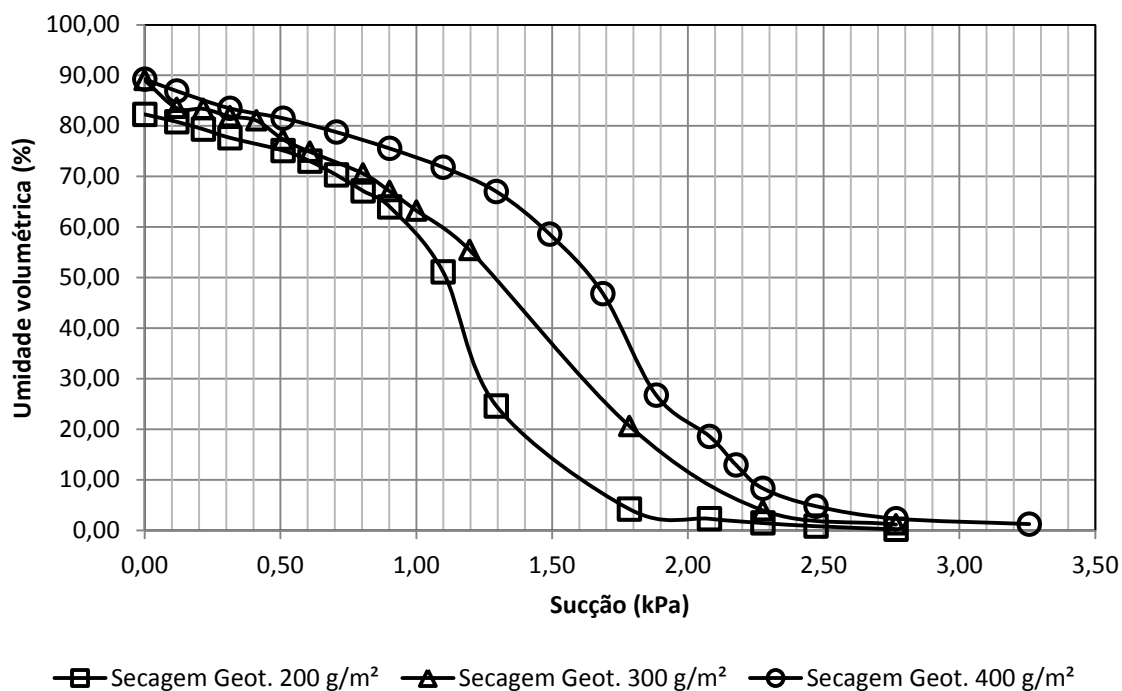


Figura 4.36 - Comparação entre curvas de retenção de água de geotêxteis com diferentes massas por unidade de área considerando o ramo de secagem e a umidade volumétrica das amostras.

Os geotêxteis com massas por unidade de área de 300 g/m² e 400 g/m² iniciaram os ensaios com uma umidade volumétrica em torno de 90% enquanto o geotêxtil de 200 g/m² iniciou o ensaio com umidade volumétrica superior a 80%. Possivelmente, o geotêxtil com menor massa por unidade de área, também com menor espessura (cerca de 2 mm), perdeu alguma umidade entre a preparação e a instalação da amostra no equipamento.

A Figura 4.37 também apresenta uma comparação entre as curvas de retenção de água, considerando as trajetórias de secagem para os três geotêxteis ensaiados, considerando os valores de sucção e grau de saturação.

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, apresentam comportamento semelhante, mesmo com valores diferentes. A drenagem inicial dos três geotêxteis apresenta uma movimentação gradual da água saindo da amostra, com o aumento do valor da sucção, não se percebe um primeiro momento onde a umidade volumétrica se mantém constante com o aumento da sucção, porém é visível que a perda de umidade é maior com o acréscimo da sucção após o valor de entrada de ar.

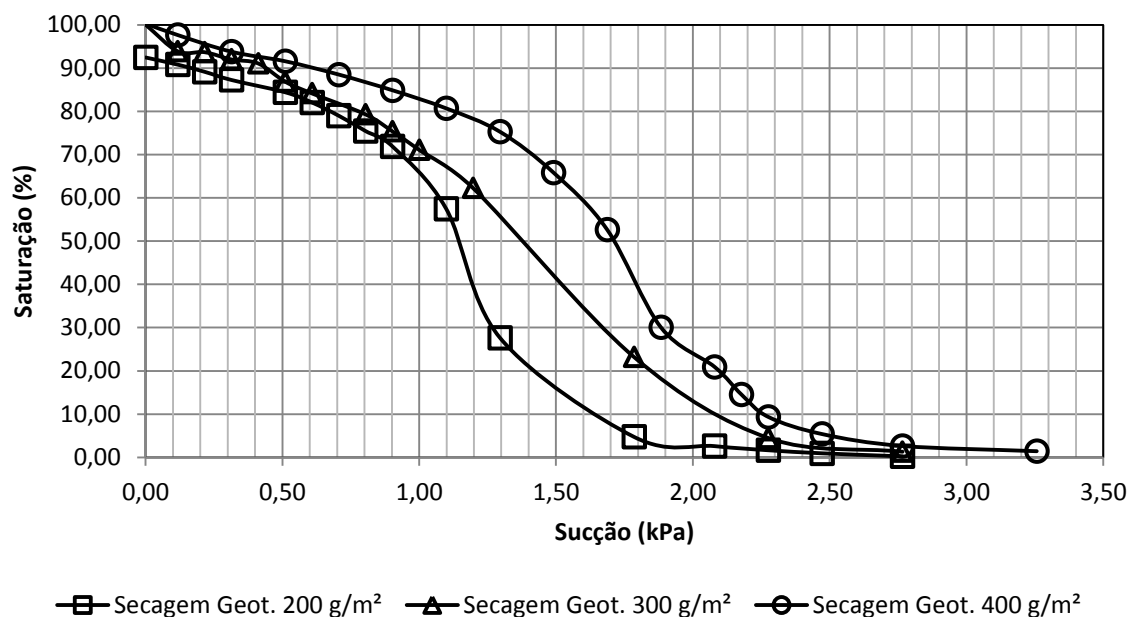


Figura 4.37 - Comparativo entre curvas de retenção de água de geotêxteis ensaiados com diferentes gramaturas, considerando o ramo de secagem e a saturação das amostras.

Analisando 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. Isto significa que é necessário aplicar uma sucção maior para retirar a água dos poros do geotêxtil, possivelmente por este geotêxteis possuir menores constrictões em seus canais de fluxo.

Considerando 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. Este comportamento é compatível com os resultados obtidos nos ensaios de infiltração em coluna, onde o geotêxtil de 400 g/m² permitiu um maior armazenamento de água na camada de solo compactado subjacente.

4.2.2 – CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NÃO SATURADA PARA OS GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS ENSAIADOS.

A determinação da função da condutividade hidráulica do material é importante para compreensão do comportamento do geotêxtil em um meio não saturado com presença de fluxo de água. A função da condutividade hidráulica (função K) representa como a retenção ou transporte de água de um meio se altera em função da sucção. Como afirmado por autores como Zornberg *et al.* (2009), métodos convencionais para determinação da função K (K_{fn}) demandam tempo e investimentos, e são sujeitos a erros experimentais. A medição direta da função de condutividade hidráulica para materiais como geossintéticos é extremamente complexa, pela dificuldade de medição de valores de sucção e velocidade de transporte de líquido nos poros do material.

De posse dos dados experimentais da curva de retenção de água podem ser aplicados modelos matemáticos para obter uma curva de retenção de água ajustada. A partir dos parâmetros obtidos por este ajuste, pode-se aplicar um modelo para obtenção da função da condutividade hidráulica saturada. Como já apresentado na seção destinada à revisão bibliográfica, o modelo adotado neste trabalho para o ajuste dos dados experimentais da curva de retenção de água foi o de van Genuchten (1980) (Equação 2.2).

O ajuste dos dados experimentais da curva de retenção de água do geotêxtil de gramatura 200 g/m² utilizando o modelo proposto por van Genuchten (1980) é apresentado na Figura 4.38.

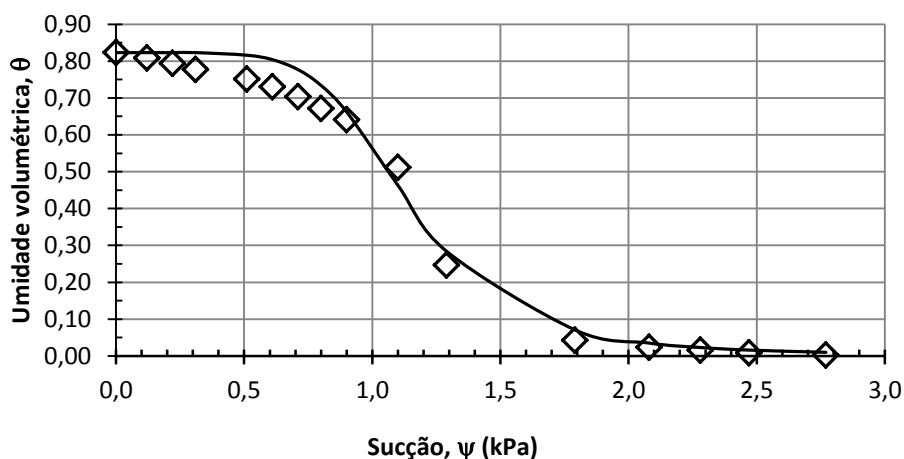


Figura 4.38 - Ajuste dos dados experimentais da curva de retenção de água do geotêxtil de 200 g/m² utilizando o modelo de van Genuchten (1980).

O ajuste de curva mostrado na Figura 4.38 considerou o valor de umidade volumétrica

saturada $\theta_s = 0,823$ e a umidade volumétrica residual $\theta_r = 0,002$. Para o melhor ajuste de curva, os parâmetros de forma previstos na Equação 4.2 foram $\alpha = 0,9091 \text{ kPa}^{-1}$ e $N = 6$ (adimensional).

Na Figura 4.39 a condutividade hidráulica do geotêxtil não tecido de 200 g/m^2 é apresentada em função da umidade volumétrica.

A curva representa a função da condutividade hidráulica do geotêxtil, obtida utilizando o modelo de Genuchten-Mualem (1980) apresentado na Equação 2.3. Com a redução da umidade volumétrica o material se torna mais resistivo ao fluxo de água.

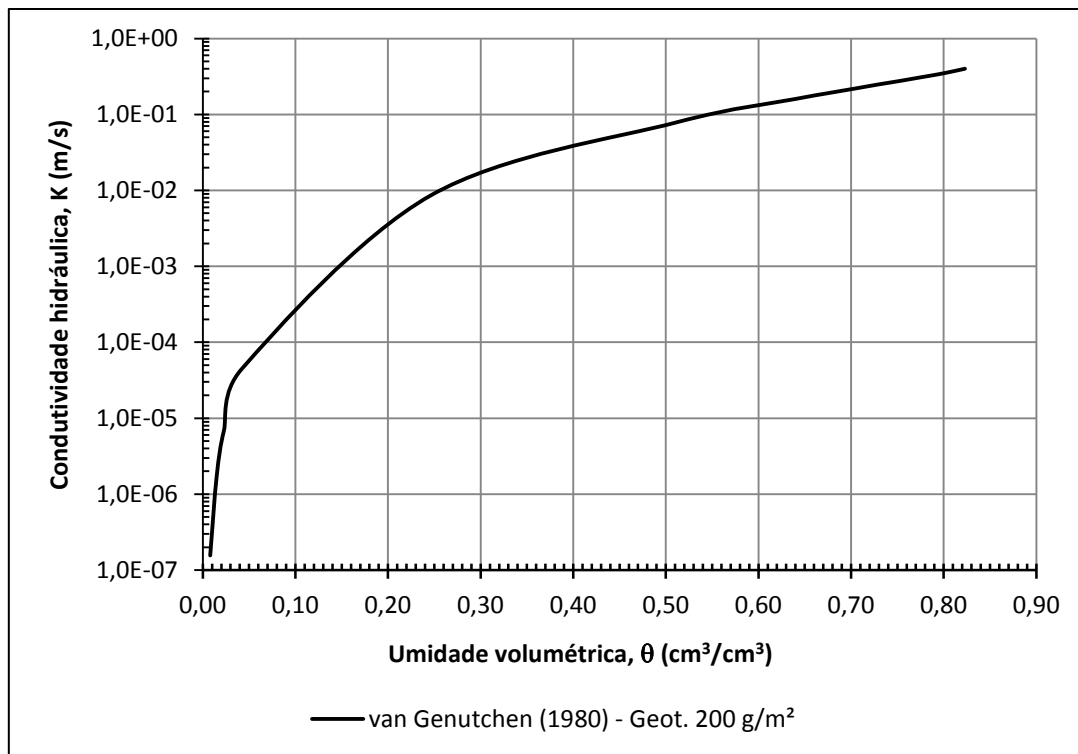


Figura 4.39 - Determinação da função da condutividade hidráulica não saturada, a partir do ajuste da curva de retenção de água utilizando o modelo van Genuchten-Mualem (1980) - geotêxtil de 200 g/m^2 .

A Figura 4.40 apresenta a função da condutividade hidráulica não saturada em função da sucção da amostra de geotêxtil, também utilizando os dados de ajuste de curva proposto por van Genuchten (1980), considerando $K_{\text{sat}}=0,4 \text{ m/s}$.

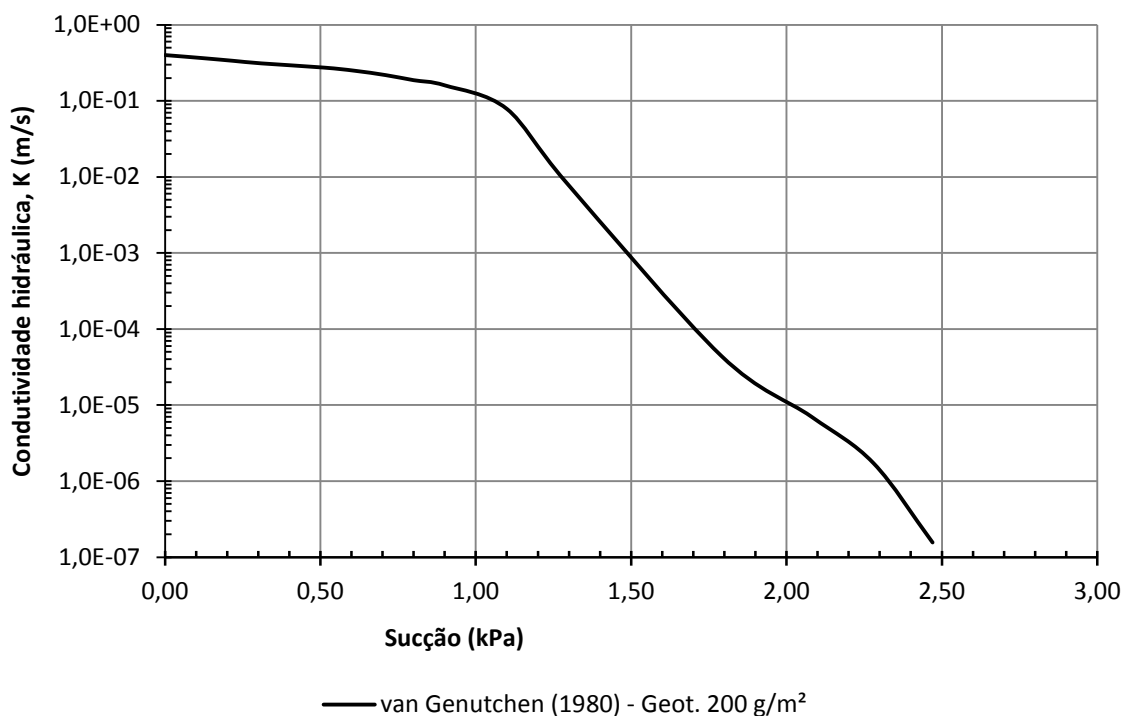


Figura 4.40 - Função da conduividade hidráulica não saturada utilizando o modelo van Genutchen-Mualem (1980) - geotêxtil de 200 g/m².

A Figura 4.41 mostra o ajuste da curva de retenção de água do geotêxtil não tecido de 300 g/m² pelo modelo de van Genutchen (1980). Foi assumida a umidade volumétrica saturada $\theta_s = 0,887$ e a umidade volumétrica residual $\theta_r = 0,012$. Os valores dos fatores de forma foram: $\alpha = 0,833 \text{ kPa}^{-1}$ e $N = 3,7$.

O ajuste foi menos acurado para os pontos próximos à umidade residual. Porém, o modelo se mostrou adequado para reproduzir o comportamento apresentado pelo geotêxtil, com um ajuste razoável entre a previsão teórica e os valores experimentais. Observa-se menor concordância entre os pontos experimentais e a curva de ajuste para os valores mais próximos da umidade volumétrica residual. Possivelmente isto ocorre devido a forma da curva proposta pelo modelo teórico.

De qualquer forma foi encontrado um bom ajuste para principalmente para a primeira metade da curva de secagem, permitindo a aplicação do modelo teórico aos dados da curva de retenção e água do geotêxtil não tecido.

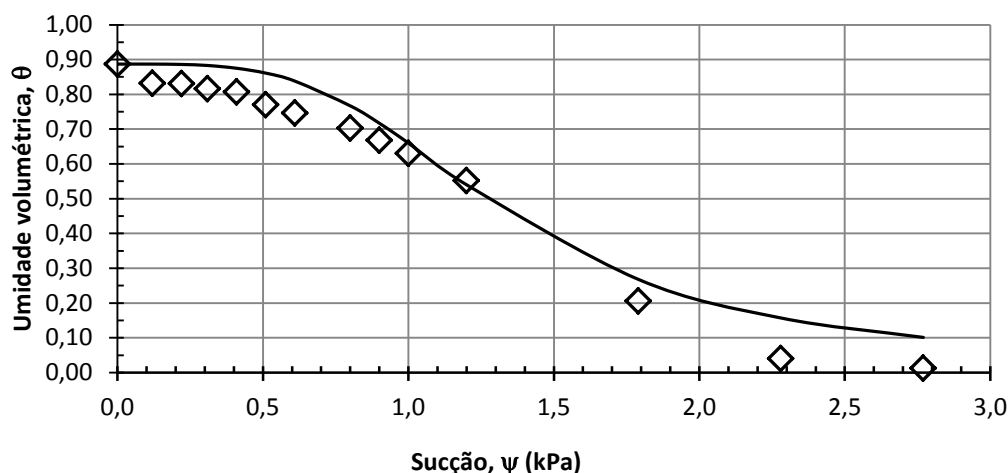


Figura 4.41 - Ajuste dos dados experimentais da curva de retenção de água do geotêxtil de 300 g/m² utilizando o modelo de van Genuchten (1980).

A Figura 4.42 apresenta a função da condutividade hidráulica do geotêxtil não tecido de 300 g/m². A condutividade hidráulica saturada do geotêxtil foi adotada como $K_{sat} = 0,4$ m/s. Próximo da umidade volumétrica residual a condutividade hidráulica não saturada foi da ordem de 10^{-6} m/s. Considerando o comportamento do geotêxtil nos ensaios de infiltração com solo RMA Tipo 2, nesta condição de umidade o material apresentou alta resistência ao fluxo de água.

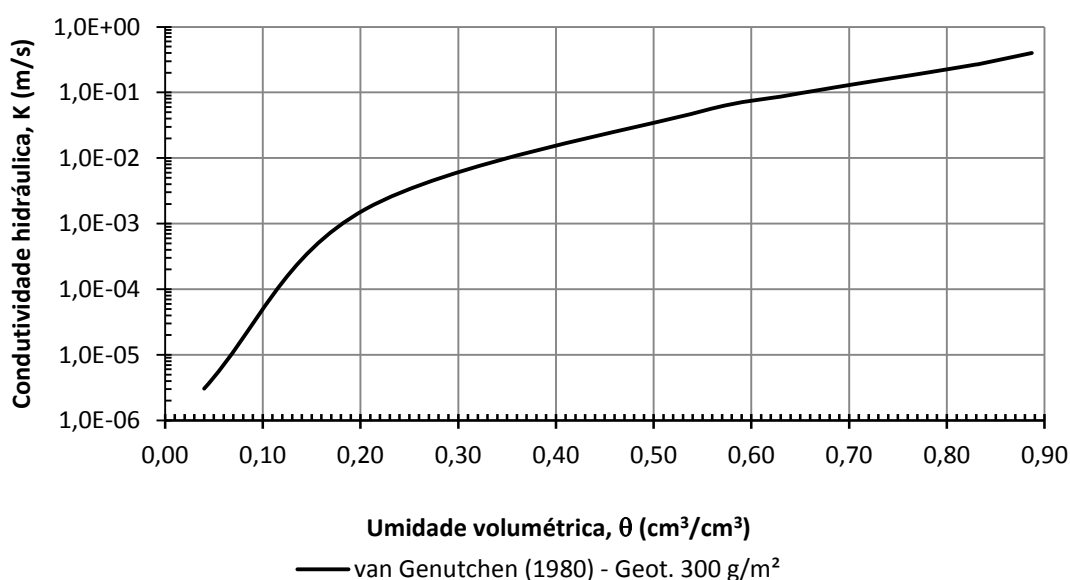


Figura 4.42 - Determinação da função da condutividade hidráulica não saturada, a partir do ajuste da curva de retenção de água, utilizando o modelo van Genuchten-Mualem (1980) para geotêxtil não tecido com gramatura de 300 g/m².

A Figura 4.43 apresenta os valores de condutividade hidráulica não saturada para o geotêxtil com gramatura de 300 g/m² em função da sucção nos poros do material. Observa-se que a uma sucção baixa (pouco maior que 2 kPa) o geotêxtil apresenta uma condutividade hidráulica da ordem de 10⁻⁶ m/s, com boa resistência à passagem de água.

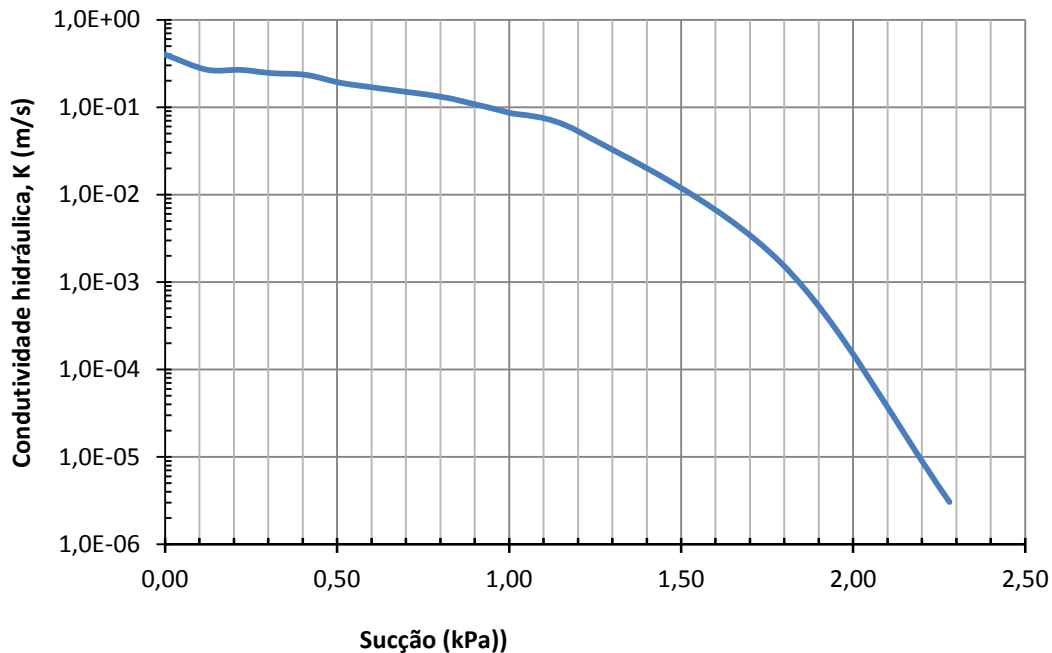


Figura 4.43 - Função da condutividade hidráulica não saturada utilizando o modelo van Genutchen-Mualem (1980) - geotêxtil de 300 g/m².

A Figura 4.44 apresenta o ajuste dos dados experimentais da curva de retenção de água do geotêxtil de 400 g/m². A curva dos dados experimentais é mais suave que a curva obtida pelo modelo matemático. Há um ajuste melhor dos pontos para os valores obtidos na parte mais inclinada da curva experimental. O ajuste é melhor para os pontos após o valor de entrada de ar, correspondente a 1,3 kPa.

Para o ajuste dos dados experimentais da curva de retenção de água do geotêxtil de 400g/m², foi considerada a umidade volumétrica saturada $\theta_s = 0,887$ e a umidade volumétrica residual $\theta_r = 0,013$. Após o ajuste da curva pelo modelo proposto por van Genutchen (1980), foram encontrados os seguintes valores para os fatores de forma: $\alpha = 0,65 \text{ kPa}^{-1}$ e $N = 7$.

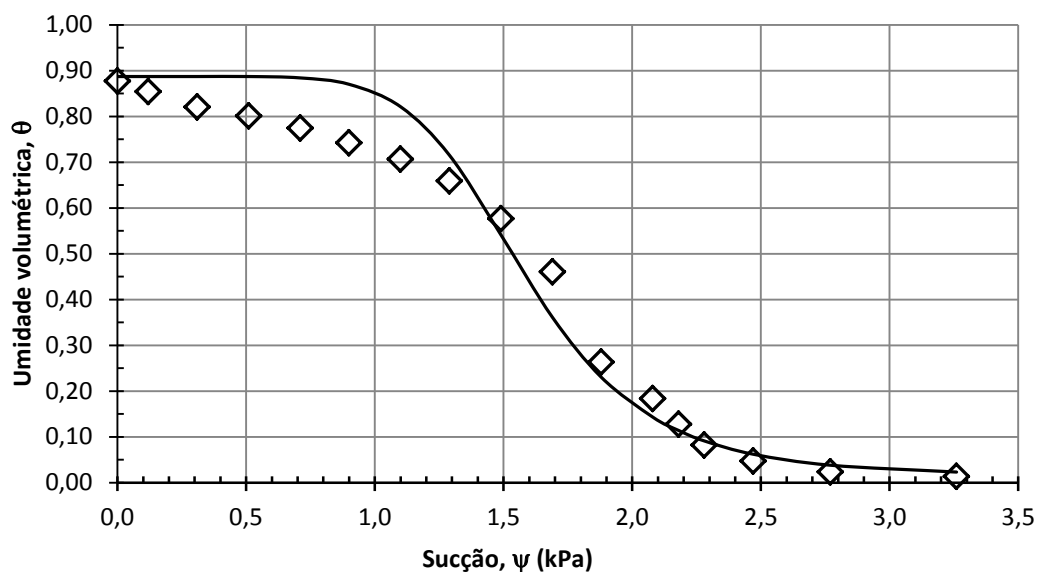


Figura 4.44 - Ajuste dos dados experimentais da curva de retenção de água do geotêxtil de gramatura 400 g/m² utilizando o modelo de van Genutchen (1980).

Na Figura 4.45 tem-se os valores da função de condutividade hidráulica, em função da umidade volumétrica, obtidos por aplicação do modelo de van Genutchen (1980). No valor próximo da umidade volumétrica residual tem-se uma condutividade hidráulica da ordem de 10⁻⁵ m/s.

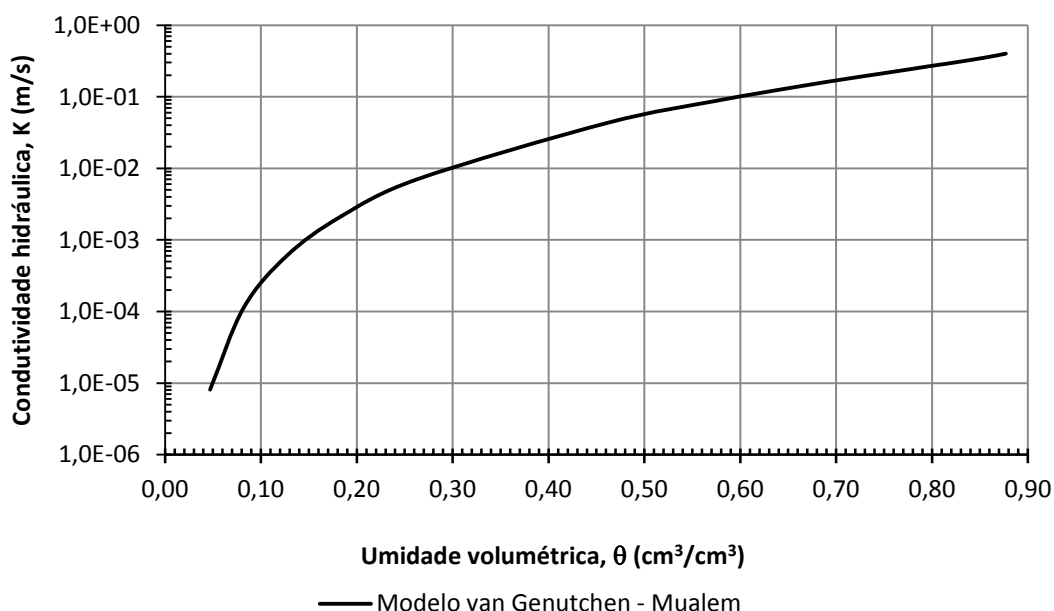


Figura 4.45 - Determinação da função da condutividade hidráulica não saturada a partir do ajuste da curva de retenção de água utilizando o modelo van Genutchen-Mualem (1980) - geotêxtil de 400 g/m².

A Figura 4.46 mostra os valores da condutividade hidráulica não saturada em função da sucção. Observa-se que, quando saturado, o material tem alta condutividade hidráulica, estimada em 0,4 m/s. Entretanto, com uma variação pequena de sucção, próximo de 3 kPa, a condutividade hidráulica do geotêxtil cai para 10^{-6} m/s, podendo o mesmo se comportar como uma barreira ao fluxo de água quando estiver perto de sua umidade residual.

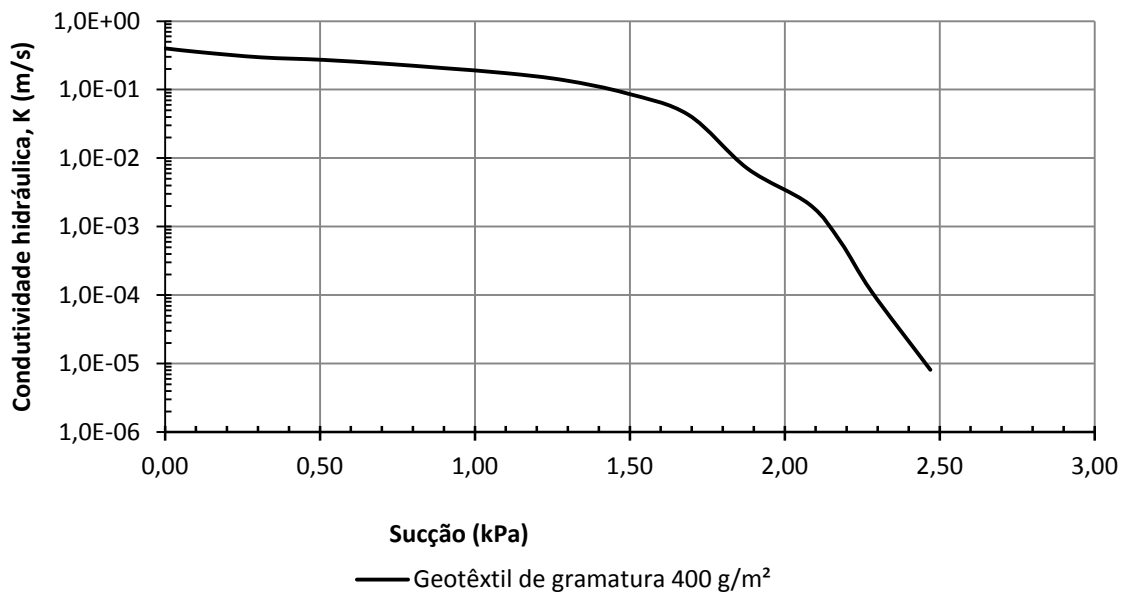


Figura 4.46 - Função da condutividade hidráulica não saturada utilizando o modelo van Genutchen-Mualem (1980) - geotêxtil de 400 g/m².

O resultado dos ajustes de curva apresentados nesta seção indicou que o modelo de previsão de curva de retenção de água e condutividade hidráulica não saturada, proposto por van Genutchen (1980), pode ser utilizado para geotêxtil não tecido para prever o seu comportamento não saturado.

4.3 – ENSAIOS DE PONTO DE BOLHA (*BUBBLE POINT TEST*) PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DE POROS EM GEOTÊXTEIS.

Foi desenvolvido um equipamento para a determinação da curva de distribuição de poros do geotêxtil. Como já afirmado, em uma trajetória de secagem a água tende a drenar primeiro dos poros maiores, e no final da trajetória de secagem a água residual tende a ficar presa nos poros

de menor diâmetro. Em uma trajetória de molhagem em um geossintético a dimensão dos poros presentes no material e a frequência com que ocorre cada tamanho relativo de poro também podem influenciar a curva de absorção de água e mesmo a velocidade em que o material aumenta sua umidade.

Ao descrever sobre a frequência de ocorrência de cada diâmetro de poro (O_i), a norma ASTM D-6767 apresenta o valor de O_i como o equivalente capilar do diâmetro do poro para o qual a porcentagem de um total de poros com diâmetro “i” em um dado geotêxtil, considerando que a superfície ocupada pelo poro é menor ou igual àquele diâmetro.

A determinação da curva de distribuição de poros prevista pelo método da norma ASTM D-6767-11 é baseado no conceito de diâmetro equivalente, considerando as forças capilares que atuam na estrutura do tecido na retenção das partículas de água presente.

Dentre os valores de referência que são obtidos pela curva de distribuição de poros está o tamanho de poro do ponto de bolha (*bubble point pore size*), simbolizado por O_{98} , como sendo o maior diâmetro de poro que efetivamente pode ser detectado pelo aumento súbito de velocidade de fluxo no início do teste com a amostra de geotêxtil molhada. Em termos práticos, o valor de O_{98} indica que este poro tem um diâmetro maior que 98% da ocorrência dos demais diâmetros de poros, sendo, portanto, o primeiro a drenar quando a amostra molhada é submetida a um fluxo de ar normal à sua superfície.

A norma ASTM D 6767-11 recomenda ainda que sejam anotados, além do valor de O_{98} , os diâmetros de poros O_{95} , O_{90} , O_{85} , O_{60} , O_{30} , O_{15} , O_{10} .

4.3.1 – ENSAIOS REALIZADOS NA UNIVERSIDADE DO TEXAS EM AUSTIN.

Os primeiros ensaios para determinação da curva de distribuição de poros dos geotêxteis ensaiados foram realizados nas instalações do laboratório de geotecnia da University of Texas, em Austin. O equipamento foi montado considerando o procedimento previsto na norma ASTM 6767-11 e tendo como referência do trabalho desenvolvido por Eun & Tinum (2011).

A Figura 4.47 mostra o resultado do ensaio de ponto de bolha com o geotêxtil de 200 g/m²,

com as curvas obtidas com o espécime inicialmente seco e com espécime molhado. A diferença entre os valores de fluxo de ar através do espécime registrados para cada intervalo de pressão corresponde à resistência à passagem de ar oferecido pelo líquido presente nos poros do material molhado. À medida que ocorre a drenagem do tecido os pontos finais do ensaio podem coincidir.

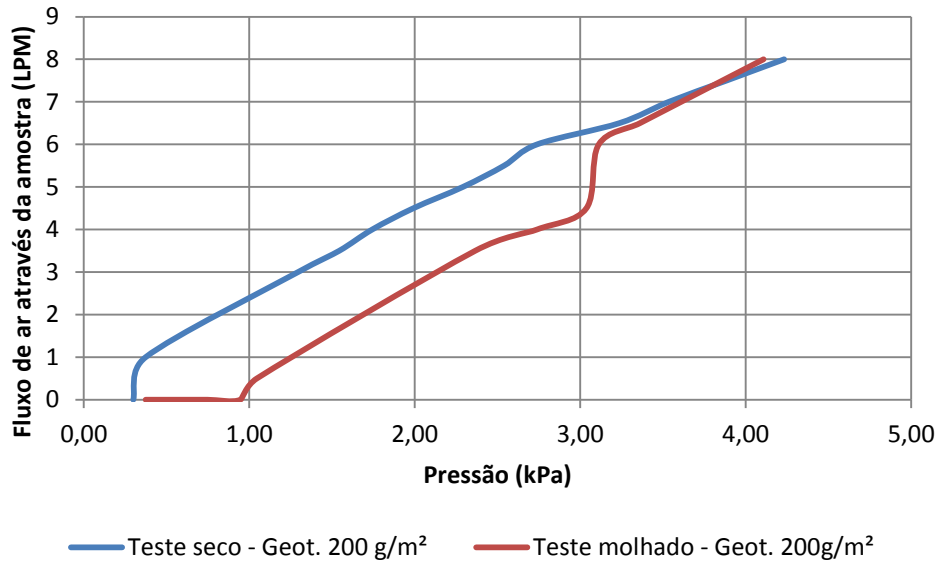


Figura 4.47 - Volume de ar versus pressão - Geotêxtil de 200 g/m²

A Figura 4.48 apresenta a curva de distribuição de poros para o geotêxtil de 200 g/m² considerando os resultados obtidos no ensaio de ponto de bolha. Pelo gráfico apresentado pode-se considerar $O_{98} = 0,27$ mm para este geotêxtil.

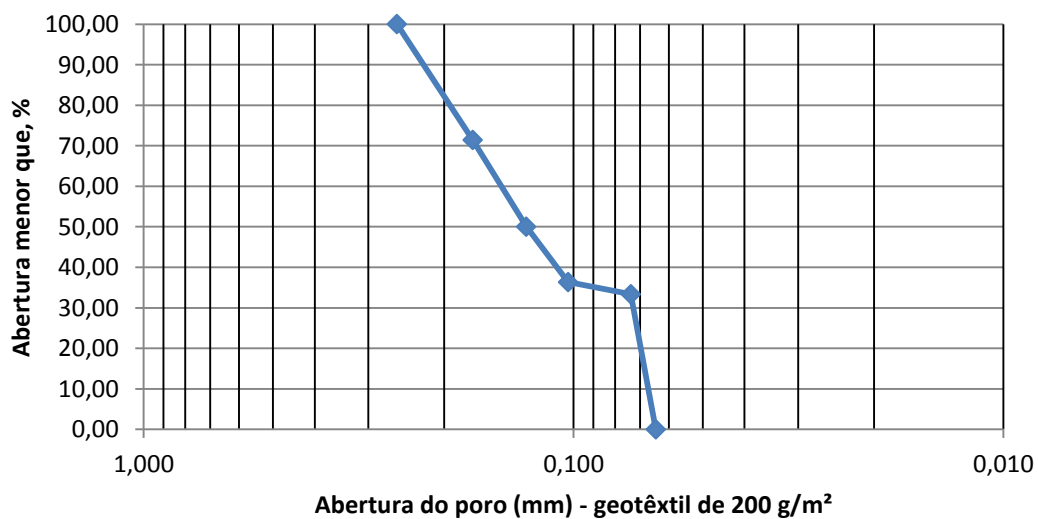


Figura 4.48 - Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 200 g/m².

O resultado do ensaio de ponto de bolha para o geotêxtil não tecido de 300 g/m² é mostrado na Figura 4.49. Para uma pressão equivalente a 4 kPa as duas curvas coincidem com a amostra molhada no valor residual de umidade.

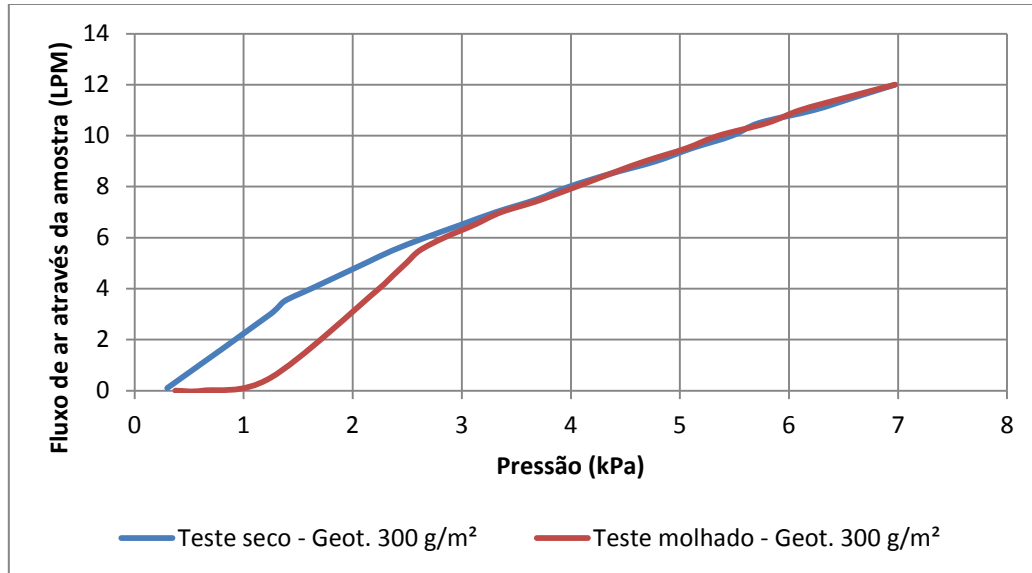


Figura 4.49 - Volume de ar versus pressão - Geotêxtil de 300 g/m²

A Figura 4.50 apresenta a curva de distribuição de poros obtida pelo ensaio de ponto de bolha para o geotêxtil com 300 g/m². O diâmetro equivalente de poro para o ponto de bolha nesta amostra foi $O_{98} = 0,27$ próximo do obtido pelo geotêxtil de 200 g/m².

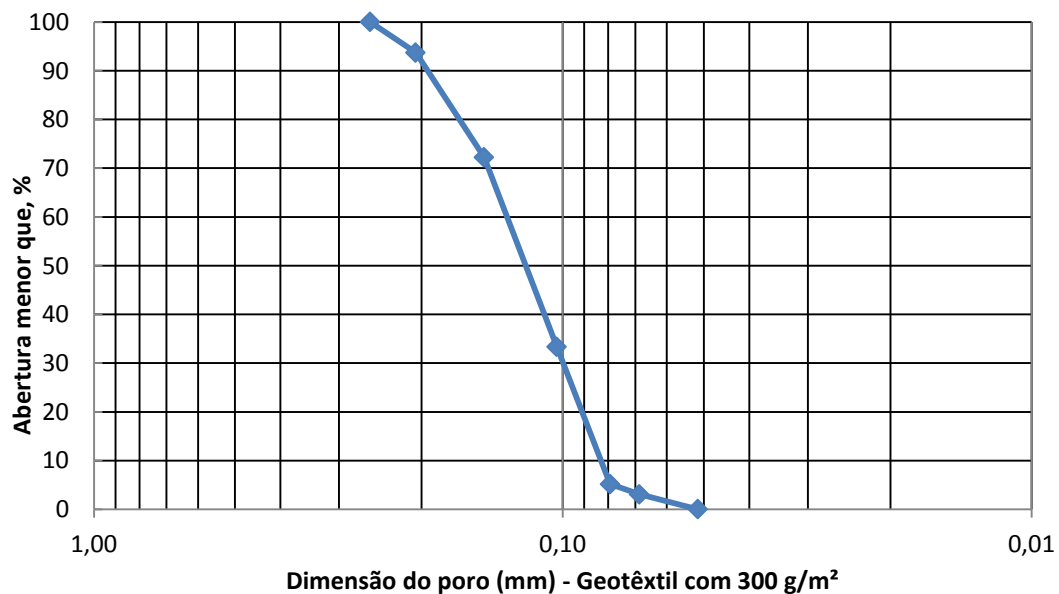


Figura 4.50 - Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 300 g/m².

Na Figura 4.51 são apresentados os dados do ensaio de ponto de bolha para o geotêxtil com massa por unidade de área igual a 400 g/m². Para um valor acima de 7 kPa de pressão as curvas dos ensaios com amostra úmida e seca coincidem. A amostra úmida neste ponto está com umidade residual.

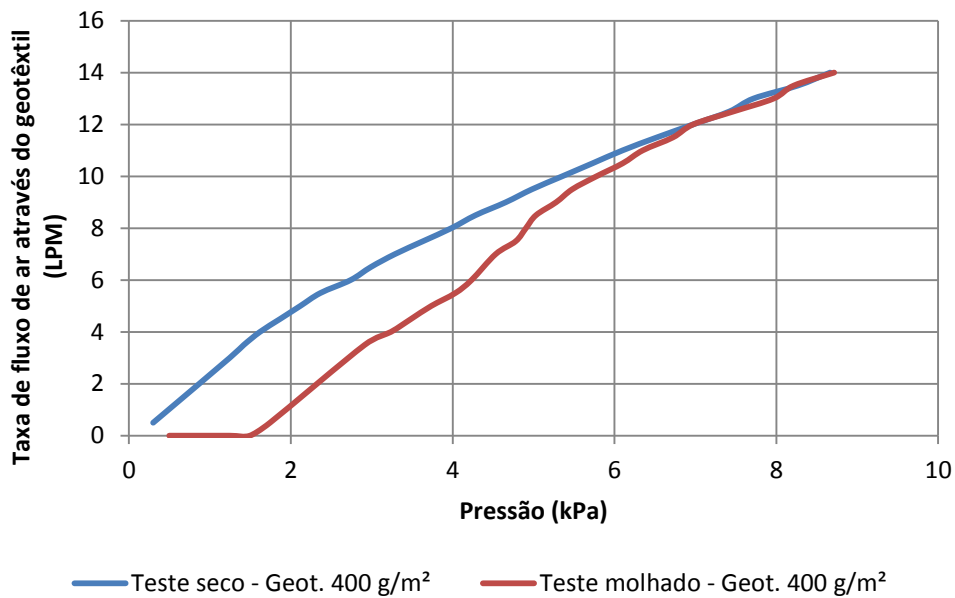


Figura 4.51 - Volume de ar versus pressão - Geotêxtil de 400 g/m².

A Figura 4.52 mostra a curva de distribuição de poros para o geotêxtil de 400 g/m². Para este material obtém-se um diâmetro equivalente ao ponto de bolha $O_{98} = 0,27$, próximo dos valores anteriores.

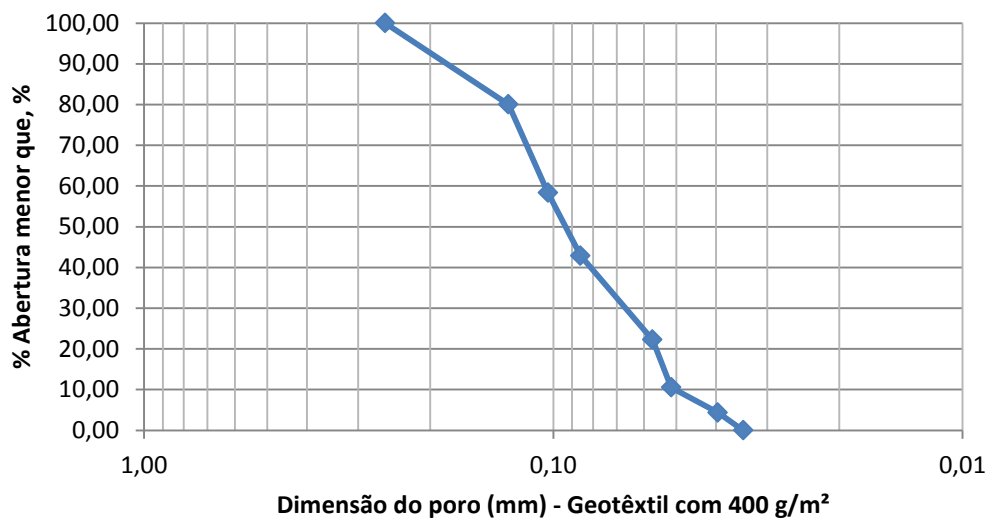


Figura 4.52 - Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 400 g/m².

A Tabela 4.1 traz um comparativo entre os diversos valores de referência de frequência de poros previstos na norma ASTM D-6767, obtidos a partir das curvas de distribuição de poros de cada material ensaiado no equipamento montado na Universidade do Texas em Austin.

Tabela 4.1 - Frequência de ocorrência de tamanho de poros para os geotêxteis ensaiados na Universidade do Texas em Austin.

Amostra	Unidade	O₉₈	O₉₅	O₉₀	O₈₅	O₆₀	O₃₀	O₁₅	O₁₀
200 g/m ²	mm	0,27	0,24	0,22	0,20	0,15	0,07	0,06	0,005
300 g/m ²	mm	0,28	0,24	0,20	0,18	0,14	0,10	0,08	0,08
400 g/m ²	mm	0,25	0,22	0,18	0,16	0,11	0,07	0,055	0,05

4.3.2 – ENSAIOS REALIZADOS NA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Os resultados obtidos com o equipamento para Ensaio de Ponto de Bolha montado na Universidade do Texas em Austin, a partir da proposta apresentada por Eun & Tinjum (2011), e de acordo com as orientações da norma ASTM D 6767, se mostraram promissores. Desta forma foi proposto o desenvolvimento de um equipamento similar para determinação da curva de distribuição de poros de geotêxteis na Universidade de Brasília, de forma a aplicar os conhecimentos técnicos e arranjos tecnológicos obtidos durante o estágio de doutorado sanduíche no exterior.

A Figura 4.53 mostra o resultado do ensaio no equipamento da UnB em um espécime de geotêxtil não tecido de 200 g/m². A amostra foi ensaiada primeiramente seca e depois úmida. A diferença do valor de fluxo de ar através da amostra, nas duas condições, em cada estágio de pressão, é utilizada para se obter a frequência de ocorrência de poros menores que determinado diâmetro, conforme apresentado na Equação 2.19. O gráfico não indica a coincidência das curvas com o material úmido e seco ao final do estágio de pressão. Isto possivelmente ocorreu devido a limitação nos equipamentos usados para medição do fluxo de ar e pressão aplicados. Desta forma o valor da pressão aplicada não foi suficiente para uma drenagem completa do geotêxtil não tecido, ou ao menos para leva-lo a uma condição de umidade volumétrica mais próxima do valor de umidade volumétrica residual.

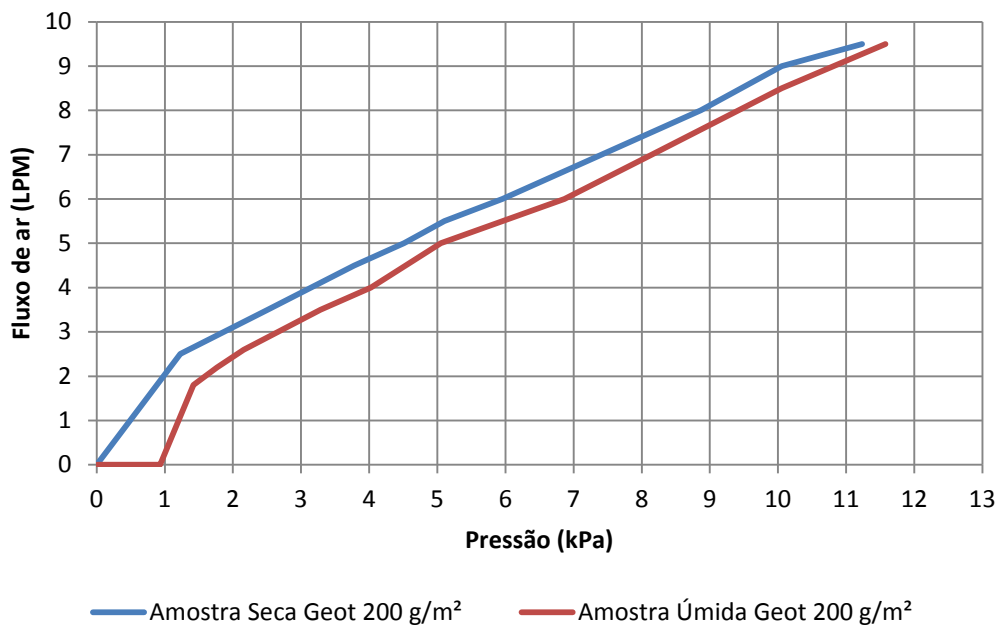


Figura 4.53 - Volume de ar versus pressão - Geotêxtil de 200 g/m².- Ensaio na UnB.

A partir dos valores de fluxo de ar através da amostra seca e úmida para cada estágio de pressão, é calculada a curva de distribuição de poros do material. Para o geotêxtil de 200 g/m² a curva obtida está apresentada na Figura 4.54. O valor de entrada do ponto de bolha para o geotêxtil não tecido com gramatura de 200 g/m² pode ser definido como $O_{98} = 0,32$ mm.

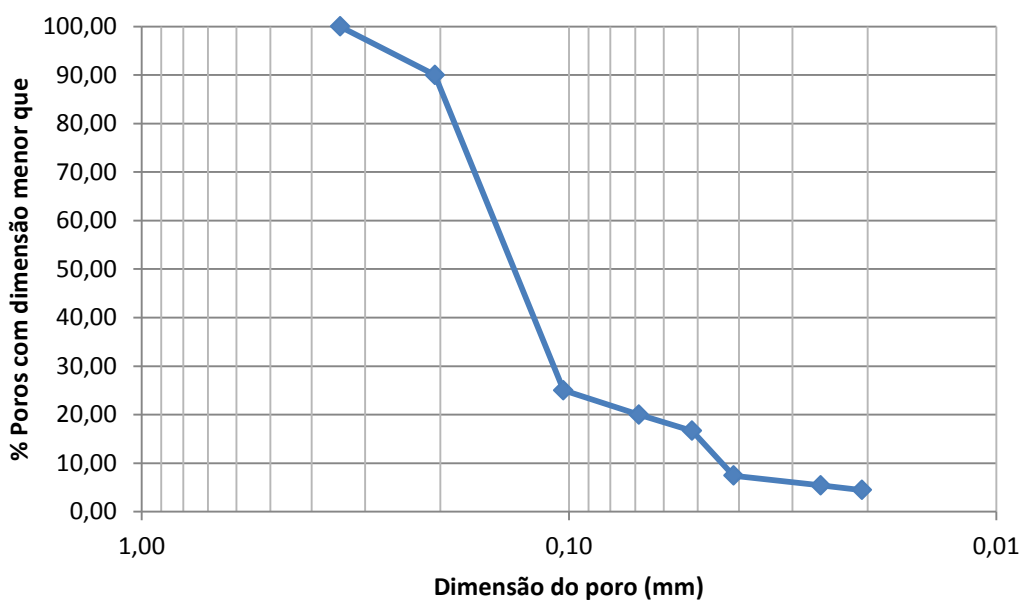


Figura 4.54 - Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 200 g/m² - ensaio realizado com equipamento montado na Universidade de Brasília.

O resultado do ensaio de ponto de bolha com o geotêxtil não tecido de 300 g/m² é ilustrado na Figura 4.55. Como ocorreu no ensaio com o geotêxtil de 200 g/m², os pontos finais das curvas não coincidem nos pontos finais de pressão. Isto ocorre devido ao intervalo de pressão que era possível registrar com o manômetro de tubo utilizado.

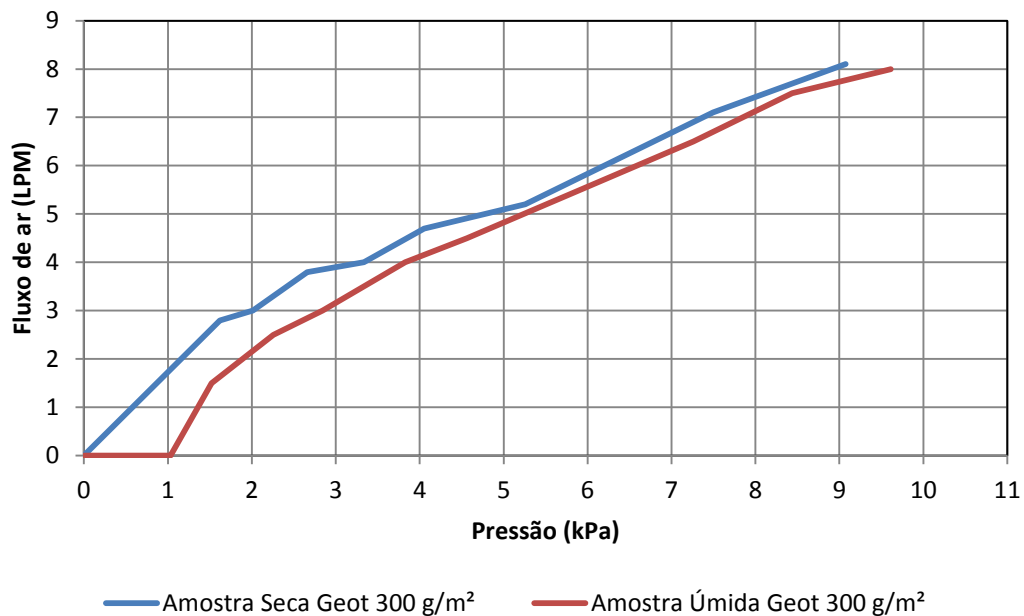


Figura 4.55 - Volume de ar versus pressão - Geotêxtil de 300 g/m².- Ensaio na UnB.

Na Figura 4.56 é apresentada a curva de distribuição de poros para o geotêxtil não tecido de 300 g/m². O valor do ponto de bolha $O_{98} = 0,33$ mm é semelhante ao obtido pelo geotêxtil de 200 g/m².



Figura 4.56 - Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil de 300 g/m² - ensaio realizado com equipamento montado na Universidade de Brasília.

A Figura 4.57 apresenta o resultado do ensaio de ponto de bolha para o geotêxtil não tecido de 400 g/m². A projeção das curvas do ensaio seco e úmido permite concluir que os valores de fluxo de ar iriam coincidir em um ponto acima da pressão de 13 kPa, devido a drenagem do material úmido.

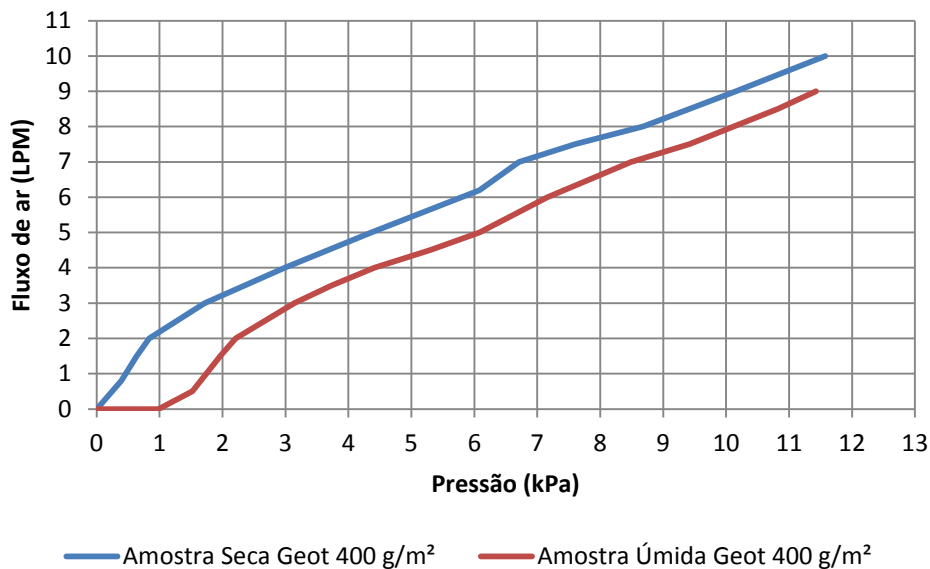


Figura 4.57 - Gráfico com dados sobre volume de ar passando pela amostra nos ensaios com amostra molhada e amostra seca. Amostra de geotêxtil não tecido com 400 g/m², ensaio realizado com equipamento montado na Universidade de Brasília.

A Figura 4.58 mostra os dados da curva de distribuição de poros obtida para o geotêxtil de 400 g/m². O valor de ponto de foi também semelhante aos demais $O_{98}=0,31$.

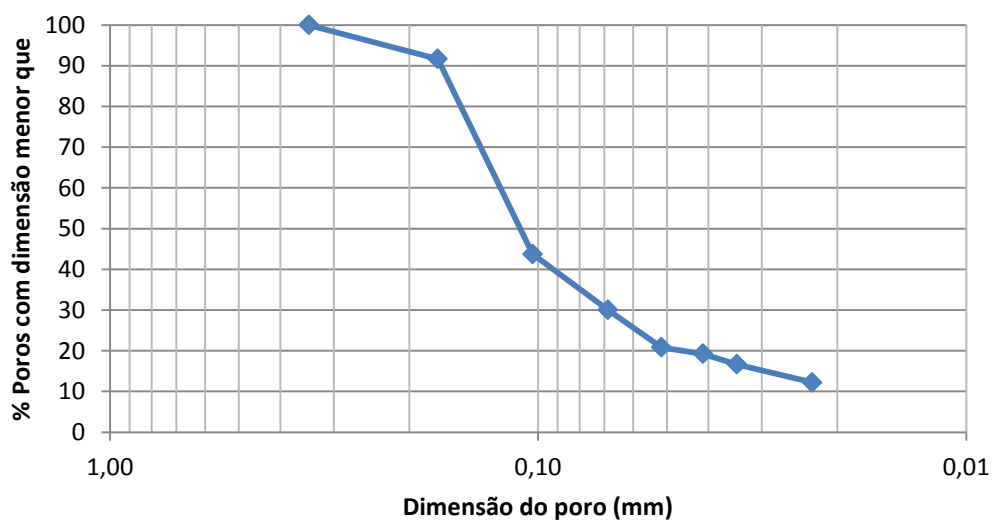


Figura 4.58 - Curva de distribuição de abertura dos poros do geotêxtil não tecido com gramatura de 400 g/m², ensaio realizado com equipamento montado na Universidade de Brasília.

A Tabela 4.2 apresenta as dimensões de poros a partir dos resultados obtidos no equipamento para Teste do Ponto de Bolha na Universidade de Brasília. Pelos resultados apresentados pelo equipamento para o Teste de Ponto de Bolha tanto na Universidade do Texas em Austin quanto da Universidade de Brasília, pode-se concluir que o equipamento atende ao previsto na norma ASTM D 6767, sendo possível utilizar esta técnica para determinar a distribuição de poros ou de constrições em geotêxteis não tecidos.

Tabela 4.2. Tamanhos de poros para geotêxteis ensaiados na Universidade de Brasília

Amostra	Unidade	O₉₈	O₉₅	O₉₀	O₈₅	O₆₀	O₃₀	O₁₅	O₁₀
200 g/m ²	mm	0,32	0,30	0,27	0,23	0,16	0,10	0,06	0,03
300 g/m ²	mm	0,33	0,3	0,25	0,2	0,14	0,11	0,06	0,04
400 g/m ²	mm	0,31	0,25	0,17	0,16	0,13	0,07	0,03	0,02

Comparando os valores apresentados pelas Tabelas 4.1 e 4.2, observa-se que os valores de poros equivalentes encontrados nos testes realizados na Universidade de Brasília, foram em média, maiores que aqueles encontrados na Universidade de Austin para o mesmo material. Considerando a Equação 2.16, temos que o tamanho do poro equivalente é inversamente proporcional à pressão aplicada. Para o equipamento montado na UnB tínhamos dificuldade de aplicar baixas pressões devido a sensibilidade do regulador de ar disponível para montagem. Para um fluxo de ar abaixo de 2 LTM houve dificuldades técnicas maiores para aplicação gradual de pressão para o equipamento da UnB do que, para o mesmo procedimento, na Universidade de Austin.

Mesmo com esta diferença na determinação dos diâmetros equivalentes dos poros, o equipamento desenvolvido na Universidade de Brasília se mostrou funcional. O passo seguinte será melhorar a sensibilidade do equipamento utilizando um regulador de ar que permita aplicar gradativamente, baixos valores de ar comprimido, resultando em maiores leituras a baixa pressão. Também será aumentada a capacidade do manômetro para registrar pressões acima de 12 kPa. A expectativa é conseguir registrar ao menos 15 kPa, considerando a limitação de altura disponível para o manômetro onde o aparelho está localizado. Este valor de pressão seria suficiente para que as curvas úmida e seca, nos ensaios realizados com geotêxteis não tecidos, pudessem coincidir nos valores maiores de fluxo de ar.

Considerando as curvas de distribuição obtidas e os gráficos de medição de fluxo de ar para o equipamento da UnB, observa-se que há uma necessidade de aprimorar a obtenção de dados sob baixas pressões (< 1 kPa) a fim de conseguir melhor medição para poros acima de 0,30 mm de diâmetro equivalente.

A medição do fluxo de ar através da amostra enfrenta a limitação natural de um fluxômetro de área variável. No caso do presente ensaio foi utilizado um fluxômetro de modelo hospitalar, capaz de medir tanto fluxo de ar quanto de oxigênio, com medição máxima de 15 LPM. Assim, a menor medida de ar que pode ser registrada com este tipo de equipamento é cerca de 0,5 LPM, isto com a melhoria da válvula de controle de pressão, responsável pela aplicação do ar comprimido no equipamento. Para os fins acadêmicos a que se destina a pesquisa, o equipamento desenvolvido na UnB se mostrou promissor, de forma que, com o devido ajuste dos sistemas de medição de fluxo de ar e de pressão, será um instrumento importante para a compreensão da estrutura porosa de geotêxteis.

5- CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 – CONCLUSÕES

A premissa que orientou toda a realização deste trabalho foi se um material como o geotêxtil não tecido, um geossintético de constituição simples, usado na maioria das vezes para fins de separação e filtração, poderia ser utilizado como elemento de cobertura final em áreas destinadas a aterros sanitários. Os resultados dos diversos ensaios e procedimentos realizados durante o desenvolvimento da tese indicam que a premissa foi confirmada.

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 ação evapotranspirativa.

Os ensaios em coluna de infiltração mostraram que uma barreira capilar, composta de uma camada de solo compactado, com baixo teor de argila, superposto a uma camada de geotêxtil não tecido pode ser efetiva como camada de cobertura de uma área destinada a depósito de resíduos sólidos, impedindo ou diminuindo o contato da água com a camada inferior de resíduos. O uso de uma camada de pedregulho sob a camada de geotêxtil não tecido não parece influenciar na capacidade de retenção de água por parte do sistema, mas pode atuar como uma camada de drenagem, dando vazão ao volume de água que eventualmente passe pelo geotêxtil não tecido no caso de uma precipitação prolongada.

As diversas configurações utilizadas nos ensaios de coluna de infiltração permitiram obter dados para elaborar cenários futuros de projetos. Os resultados estiveram de acordo com as expectativas e mostraram que, para climas áridos e semiáridos, a utilização de uma cobertura evapotranspirativa, em substituição a um sistema de cobertura resistivo, pode ser uma opção viável. O geotêxtil não tecido, de poliéster, demonstrou ser um material que pode funcionar tanto como elemento de separação entre camadas de geomateriais, como pode funcionar como uma barreira temporária a passagem de um fluxo de água.

Considerando o resultado das curvas de retenção de água dos três geotêxteis não tecidos utilizados nesta pesquisa observa-se que o material, quando saturado e posteriormente submetido a um processo de secagem por incrementos de sucção, alcança a umidade volumétrica residual a baixos valores de sucção, em torno de 3,5 kPa. A curva de retenção de água no ramo de molhagem indica que, uma vez sob sua umidade volumétrica, o material só volta a absorver água para um valor de sucção muito próximo de zero. Esta característica do material está de acordo com o seu comportamento como elemento de uma barreira capilar. Quando o solo sobre o geossintético está bem próximo da saturação, com baixo valor de sucção, o geotêxtil reduz sua umidade mantendo suas características hidrofóbicas e atuando como uma barreira à passagem de água.

As curvas de condutividade hidráulica não saturada dos geotêxteis, obtidas a partir do ajuste da curva de retenção de água pelo modelo proposto por van Genuchten (1980), indicam que, uma vez saturado, o geotêxtil tem alta condutividade hidráulica. Entretanto, com uma pequena variação da sucção do material (em torno de 3 kPa) a condutividade hidráulica do material é reduzida drasticamente, de forma que o geotêxtil não tecido pode ficar com uma capacidade de condutividade de água menor que o solo da camada de barreira capilar, atuando como uma barreira ao fluxo de água.

Os ensaios para determinação da distribuição de poros dos geotêxteis conseguiram registrar os diâmetros de poros até cerca de 0,30 mm. Poros maiores não foram detectados com a atual configuração do equipamento. Porém, na análise das curvas de distribuição de poros para diâmetros no intervalo de 0,30 mm a 0,005 mm foram observados valores bem próximos entre os três materiais utilizados, possivelmente devido ao processo de deposição das fibras de poliéster, inerente ao processo de fabricação, ou ainda por limitações da atual configuração do equipamento para realização do ensaio de ponto de bolha.

Considerando o conjunto dos resultados, pode-se observar que a utilização de geotêxtil não tecido como elemento de uma barreira capilar pode ser efetivo para aumentar a capacidade de retenção de água do sistema. Por ser um material disponível no mercado e de simples instalação, pode ser uma solução tecnológica adequada para cobertura final em áreas destinadas a deposição de resíduos sólidos. Importante ressaltar que, por não ser um material impermeável, a instalação de um geotêxtil não tecido como elemento de cobertura em área de

depósito de rejeitos, exigirá um projeto detalhado, prevendo inclusive o rompimento da barreira representada pelo geotêxtil quando a água acumulada na camada superior de solo for maior que a capacidade de retenção do sistema. Para estes casos pode ser previsto em projeto uma camada de drenagem abaixo da camada de geotêxtil, para proporcionar desvio lateral da frente de umidade e reduzir a ocorrência de água no resíduo depositado.

5.2 – SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com o objetivo de melhorar a compreensão sobre o comportamento de barreiras evapotranspirativas com a presença de geossintéticos, algumas sugestões de pesquisas futuras podem ser feitas a partir dos ensaios e análises desenvolvidos no âmbito deste trabalho, tais como:

- Realizar ensaios de infiltração em coluna com materiais utilizados na execução de aterros sanitários na região do Distrito Federal, com e sem a presença de geotêxteis, para reproduzir o comportamento de uma barreira evapotranspirativa com solos locais.
- Realização em campo aberto de ensaio em escala maior, com a presença de solo compactado e geotêxtil, e instrumentada com sensores de umidade e pressão, simulando ciclos de molhagem e secagem dentro das condições atmosféricas locais.
- Realização de ensaios de infiltração em colunas com perfis de solo de maior espessura e com simulação de base inclinada para observar o comportamento drenante após a ocorrência de quebra da barreira.
- Montagem de um sistema para medição da curva de retenção de água em geotêxteis, no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília, para medição em geotêxteis não tecidos, tecidos e geocompostos.
- Aprimoramento do equipamento de realização do ensaio de ponto de bolha, visando aumentar a sensibilidade da válvula do regulador de ar e a capacidade de medição do manômetro de água, a fim de obter mais pontos de medida de fluxo de ar sob baixas pressões.
- Análises utilizando ferramentas numéricas para simulações em campo do comportamento de barreiras evapotranspirativas compostas de solo e geossintéticos, com diferentes configurações e com diferentes ciclos de molhagem e secagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D 6767-11. Standard test method for Pore Size Characteristics of Geotextiles by Capillary Flow Test. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM D4318-10, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM D854-92. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- AYDILEK, A.H., OGUZ, S.H. and EDIL, T.B., (2005). Constriction Size of Geotextile Filters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 131 (1): 28-38.
- AZEVEDO (2012). Determination of the hydraulic characteristics of unsaturated soils using a centrifuge permeameter. PhD Thesis, Graduated School of The University of Texas at Austin, Austin, USA, 394 p.
- BATHURST, R.J. (2007). Funções dos geossintéticos. IGS Leaflets on Geosynthetics Applications, International Geosynthetics Society, IGS, USA, 2 p.
- BHATIA, S.K. and SMITH, J.L., (1996). Geotextile Characterization and Pore-Size Distribution: Part I. A Review of Manufacturing Processes”, *Geosynthetics International*, 1: 85-105.
- BOUAZZA, A., FREUND, M., NAHLAWI, H. (2006a). Water retention of nonwoven polyester geotextiles. *Polymer Testing*, (25): 1038-1043.

- BOUAZZA, A., ZORNBERG, J.G., MCCARTNEY, J.S. & NAHLAWY, H. (2006b) Significance of unsaturated behaviour of geotextiles in earthen structures. *Australian Geomechanics*, (41): 133-141.
- EUN, J.W. & TINJUM, J.M.(2011). Variation in Air Entry Suction of Nonwoven Geotextiles with Pore Size Distribution. *Unsaturated Soils: Theory and Practice - Jotisankasa, Sawangsuriya, Soralump and Mairaing (Editors), Kasetsart University, Thailand*, p.p.553-558.
- FREDLUND, D.G., and RAHARDJO, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley and Sons Inc., New York.
- 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.
- KOERNER, R.M. 1998. *Designing with geosynthetics*.fourth ed.,Prentice-Hall Book Co., Upper saddle river, NJ.
- KUHN, J.A. and ZORNBERG, J.G. (2006). Field Suction and Effect of Cracking in Highly Plastic Clay. Technical Report, Center for Transportation Research of The University of Texas at Austin, Austin, USA, 176 p.
- McCARTNEY (2007). Determination of the hydraulic characteristics of unsaturated soils using a centrifuge permeameter. PhD Thesis, Graduated School of The University of Texas at Austin, Austin, USA, 394 p.

- McCARTNEY, J.S., and ZORNBERG, J.G. (2007). Hydraulic Interaction between Geosynthetic Drainage Layers and Unsaturated Low Plasticity Clay. Geo-Denver 2007 Conference, Denver, Colorado, 1(10).
- McCARTNEY, J.S., and ZORNBERG, J.G. (2007a). "Effect of Wet-Dry Cycles on Capillary Break Formation in Geosynthetic Drainage Layers." Proceedings of the Geosynthetics 2007 Conference, Washington D.C., January 16-19, pp. 1-17.
- 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 PanAmerican Geosynthetics Conference and Exhibition, Cancún, México. 252-261.
- 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.
- PALMEIRA, E. M. ; GARDONI, M. G.(2002) . Drainage and Filtration Properties of Non-Woven Geotextiles Under Confinement Using Different Experimental Techniques. Geotextiles and Geomembranes. 20: 97-115.

- PALMEIRA, E. M. ; GARDONI, M. G.:(2000). The Influence of Partial Clogging and Pressure on the Behaviour of Geotextiles in Drainage Systems. *Geosynthetics International*. 7: 406-431.
- PARK, K.D., FLEMING, I.R. (2006). Evaluation of a Geosynthetic Capillary Barrier. *Geotextiles and Geomembranes*. 24: 64-71
- STORMONT, J., HENRY, K. & EVANS, T. (1997). Water retention functions of four nonwoven polypropylene geotextiles. *G.I. 4 (6)*: 661-672.
- 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.
- 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. (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