



TESE DE DOUTORADO

**CONSTRUÇÃO DE CANAL DE  
FLUXO 2D PARA  
MONITORAMENTO E  
AVALIAÇÃO DO  
DESEMPENHO DE  
BARREIRAS CAPILARES E  
RESISTIVAS**

BRUNO ROGÉRIO DA HORA LÔBO

SALVADOR – BAHIA

10 – 2022



**BRUNO ROGÉRIO DA HORA LÔBO**

**CONSTRUÇÃO DE CANAL DE FLUXO 2D PARA MONITORAMENTO  
E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE BARREIRAS CAPILARES E  
RESISTIVAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências, Energia e Ambiente, Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Ciências, Energia e Ambiente.

Orientadores: Prof. Dr. Sandro Lemos Machado  
Prof. Dr. Edson P. Marques Filho

Salvador  
2022

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

---

---

TERMO DE APROVAÇÃO

**BRUNO ROGÉRIO DA HORA LÔBO**

**“CONSTRUÇÃO DE CANAL DE FLUXO 2D PARA MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE BARREIRAS CAPILARES E RESISTIVAS”.**

Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Energia e Ambiente, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinadora:

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** SANDRO LEMOS MACHADO  
Data: 17/11/2022 15:03:22-0300  
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. Sandro Lemos Machado \_\_\_\_\_  
Doutor em Geotecnia pela Universidade de São Paulo, USP, Brasil (1998).

Prof. Dr. Edson P. Marques Filho Edson P. Marques Filho  
Doutor em Meteorologia pela Universidade de São Paulo, USP, Brasil (2004).

Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe Iuri Muniz Pepe  
Doutor em Física Nuclear pelo Université Catholique de Louvain, UCL, Bélgica (1995).

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MIRIAM DE FATIMA CARVALHO MACHADO  
Data: 02/12/2022 06:30:06-0300  
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Profª. Dra. Miriam de Fatima Carvalho \_\_\_\_\_  
Doutora em Geotecnia pela Escola de Engenharia de São Carlos Usp, EESC/USP, Brasil (1999).

Prof. Dr. José Camapum de Carvalho José Camapum de Carvalho  
Doutor em Engenharia Civil (Geotecnia) pelo Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, INSA, – França (1985).

Profª. Dra. Riseuda Pereira de Sousa Riseuda Pereira de Sousa  
Doutora em Engenharia Industrial pela Universidade Federal da Bahia, Brasil (2012).

Salvador, 16 de novembro de 2022.



# Agradecimentos

Eu gostaria de agradecer ao Deus que é Pai, Filho e Espírito Santo, que por sua imensa misericórdia, me concedeu a graça de chegar a este momento. À Virgem Maria e a São Miguel Arcanjo pelas suas poderosas intercessões. Não quero deixar de agradecer também ao auxílio do meu querido Anjo da Guarda que em momentos muitos difíceis me socorreu e intercedeu em meu favor.

Gostaria de agradecer ao professor Sandro Lemos Machado, pela sua imensa paciência, lamento do fundo de meu coração por qualquer ação negativa de minha parte ao longo desse doutorado. Gostaria de confessar que em toda minha vida eu só tive tanto talento em fazer besteira diante de meu pai, a quem eu tanto queria agradar e por vezes incorria em erros bestas e desastrados, assim como fiz diante você em muitos momentos nesses últimos 5 anos. Gostaria de agradecer professor pelo exemplo de servidor público que você passa aos seus alunos e orientandos. Eu diante de uma visão pobre que tinha do que era o trabalho, hoje consigo enxergar os miseráveis vícios que me acometiam, e inspirado no seu exemplo espero combatê-los ao longo da minha carreira acadêmica.

Quero agradecer ao professor Edson Pereira Marques Filho por todo o auxílio como orientador desse trabalho. Sempre estive disponível para sanar dúvidas e oferecer sugestões que colaborassem para o bom andamento do trabalho.

Não posso deixar de agradecer ao professor Caio Mário Castro de Castilho, coordenador do Cienam durante boa parte do meu doutorado, obrigado por todo incentivo! Um exemplo extraordinário de pessoa!

Quero agradecer à minha querida esposa, Sabrina Guimarães Sampaio, e dizer que sem ela esse trabalho não seria possível. Obrigado por cuidar de nossa casa, obrigado por cuidar de nosso filho, obrigado por cuidar de mim! Te amo e agradeço a Deus por você estar na minha vida.

Quero agradecer ao meu filho, Miguel Sampaio Lôbo, por ter sido o motivo da realização desse doutorado. Lamento pela minha ausência nesses 5 anos mas eu só fiz esse doutorado para buscar ser um bom exemplo pra você. Te amo meu filho, que desde tão cedo já não gosta de meus beijos.

Quero agradecer aos meus queridos pais Roberto Santana Lôbo e Iara Silva da Hora por todo o suporte ao longo dessa tese. Eu cresci pra tentar ser independente, mas esse doutorado me mostrou o quanto eu dependo de vocês e o quanto vocês ainda podem fazer por mim! Amo vocês e agradeço muito pelo auxílio direto e indireto que vocês me ofereceram.

Quero agradecer aos meus pais espirituais Dom Henrique Soares (*in memoriam*), Pe. Léo (*in memoriam*), Pe. Paulo Ricardo e ao meu atual Diretor Espiritual Pe. João Paulo Veloso. Não fosse pelos seus Santos ensinamentos e conselhos, não sei o que seria de mim hoje.

Quero agradecer ao irmão que o doutorado me deu, Jeová Cirilo da Gama, pelos inúmeros auxílios prestados, meu personal trainer, parceiro, mão abençoada do GEOAMB, conselheiro, churrasqueiro... Maninho meu irmão que saudades de almoçar e trocar ideias com você! Eu não sei como eu conseguiria fazer esse trabalho sem você meu velho. Muito obrigado mesmo por todo o auxílio, que Deus te abençoe!

Gostaria de agradecer à professora Miriam de Fátima Carvalho que nunca passou pelo canal sem dar um auxílio no processo que estava sendo elaborado! Obrigado pelo seu bom humor professora e pelas preciosas dicas e conselhos a cerca do trabalho!

Quero agradecer ao GEOAMB pela excelente infraestrutura e ambiente de trabalho! Nunca faltou nada para realização dessa tese, técnicos qualificados e dispostos, computadores rápidos, ambientes adequados de trabalho, enfim, uma estrutura completa!

Gostaria de agradecer aos técnicos Ricardo Santana e Seu Antônio (*in memoriam*). Ricardo muito obrigado por todos os deslocamentos e boas conversas, além de sua sempre disposição em ajudar! Muito obrigado meu velho!

Quero agradecer aos muitos e bons amigos que passaram pelo Geoamb, Átila Caldas, Adriano Braga, Juliana Diniz, Fernando Lima, Ramile Uzeda, Larissa Damasceno, Leandro Anunciação, Murilo Pereira, Antônio, Michele, Taís, Fernando, Camila, Nicolle, Érdeson. Muito obrigado pelas conversas e apoio ao longo desse trabalho.

Gostaria de agradecer aos amigos Marcus Vinícius e Janaína Lima de Araújo, pelo apoio direto em diferentes etapas dessa tese, desde o apoio à Miguel e Sabrina, até a ajuda prestada por Jana em assumir algumas turmas minhas na UFT para que eu pudesse prorrogar o meu período de afastamento para o doutorado.

Quero agradecer aos meus pares na UFT por terem permitido o afastamento para a minha qualificação.

Quero agradecer à Universidade Federal do Tocantins por ter permitido o meu afastamento para o doutorado.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pela concessão da bolsa de doutorado que viabilizou a realização desse trabalho.

*“Não abandonamos sem dor o que possuímos com  
prazer.”  
Santo Agostinho*

# Resumo

O presente trabalho apresenta a construção de um canal de fluxo 2D instrumentado com medidores de sucção e de umidade, para avaliação e simulação de camadas de cobertura de aterros sanitários, em um ambiente com controle de intempéries. Considerando o objetivo de comparar diferentes soluções de camadas de cobertura expostas ao clima típico do semi-árido brasileiro, o tratamento dos dados climáticos de quatro cidades pertencentes ao semi-árido (Remanso, Petrolina, Irecê e Barra) foi realizado e utilizados como base para realização dos ensaios. Ao longo deste trabalho dois tipos de camadas de cobertura foram simuladas (convencional e barreira capilar). No primeiro ensaio foi imposto o controle da radiação (por meio da construção de um simulador solar) e pluviometria (por meio da construção de um simulador de chuva) em uma barreira capilar composta por um solo argiloso e uma areia mal graduada, enquanto que no segundo ensaio além da radiação e regime pluviométrico, a temperatura (controlada a partir do equilíbrio entre o simulador solar e um condicionador de ar) e a umidade relativa (controlada com a utilização de um desumidificador), também foram objeto de controle, em uma camada convencional utilizando apenas o solo argiloso com baixa permeabilidade. Estes dois experimentos mostraram a relevância e influência das variáveis climáticas na resposta das camadas finais simuladas, bem como o potencial da utilização do canal de fluxo na geração de dados relevantes para simulação de modelos de infiltração nessas camadas. Quanto ao desempenho dos diferentes tipos de camada de cobertura utilizado, a configuração simulada da barreira capilar apresentou uma melhor resiliência e um bom desempenho às condições impostas a ela, o volume coletado pelo dreno de fundo do canal foi muito baixo. A barreira convencional, no entanto, submetida aos baixos valores de umidade do semi-árido nordestino não mostrou um desempenho bom, devido ao grande grau de fissuramento ao longo de toda a extensão da barreira simulada.

**Palavras-chave:** Barreiras Capilares, Interação Solo-Atmosfera, Coberturas Finais, Solos Não Saturados, Semi-árido, Resíduos Sólidos Urbanos.

# Abstract

This work presents the construction of a 2D flow channel instrumented with suction and humidity meters, for the evaluation and simulation of sanitary landfill cover layers, in an environment with weather control. Considering the objective of comparing different solutions of roofing layers exposed to the typical climate of the Brazilian semi-arid region, the treatment of climate data from four cities belonging to the semi-arid region (Remanso, Petrolina, Irecê and Barra) was carried out and used as a basis for carrying out the tests. Throughout this work two types of coverage layers were simulated (conventional and capillary barrier). In the first test, the control of radiation (through the construction of a solar simulator) and pluviometry (through the construction of a rain simulator) was imposed on a capillary barrier, while in the second test, in addition to the radiation and pluviometric regime, the temperature (controlled from the balance between the solar simulator and an air conditioner) and relative humidity (controlled using a dehumidifier), were also controlled, in a conventional layer using a clayey soil with low permeability. These two experiments showed the relevance and influence of climatic variables on the response of the simulated final layers, as well as the potential of using the flow channel to generate relevant data for simulating infiltration models in these layers. As for the performance of the different types of cover layer used, the simulated configuration of the capillary barrier showed better resilience and a good performance to the conditions imposed on it, the volume collected by the bottom drain of the channel was very low. The conventional barrier, however, submitted to the low humidity values of the northeastern semi-arid region, did not show a good performance, due to the high degree of cracking along the entire length of the simulated barrier.

**Key words:** Capillary Barriers, Soil-Atmosphere Interaction, Final Landfill Covers, Unsaturated Soils, Semi-arid, Urban Solid Waste.

# Sumário

Agradecimentos . . . . .	4
Dedicatoria . . . . .	6
Resumo . . . . .	7
Abstract . . . . .	8
Sumário . . . . .	9
Lista de Figuras . . . . .	13
Lista de Tabelas . . . . .	18
<b>Capítulo 1 Introdução . . . . .</b>	<b>23</b>
1.1 Objetivos . . . . .	26
1.1.1 Objetivo geral . . . . .	26
1.1.2 Objetivos específicos . . . . .	26
<b>Capítulo 2 Revisão bibliográfica . . . . .</b>	<b>27</b>
2.1 Sistemas de cobertura de aterros sanitários . . . . .	27
2.2 Componentes gerais de sistemas de cobertura de aterros sanitários . . . . .	27
2.2.1 Camada superficial . . . . .	28
2.2.2 Camada de proteção . . . . .	29
2.2.3 Camada de drenagem . . . . .	29
2.2.4 Barreira hidráulica . . . . .	30

2.2.5	Camada de Coleta de gás . . . . .	32
2.2.6	Camada de fundação/regularização . . . . .	33
2.3	Coberturas resistivas ou convencionais . . . . .	34
2.4	Coberturas alternativas . . . . .	35
2.4.1	Coberturas evapotranpirativas . . . . .	37
2.4.2	Barreiras Capilares . . . . .	38
2.4.3	Barreiras capilares naturais . . . . .	39
2.4.4	Mecanismos de funcionamento de uma barreira capilar . . . . .	41
2.4.5	Armazenamento d'água no solo . . . . .	42
2.4.6	Método para estimar a capacidade de armazenamento de água de barreiras capilares . . . . .	43
2.5	Conceitos associados ao fluxo em meios não saturados . . . . .	46
2.5.1	Curvas de retenção do solo . . . . .	46
2.5.2	Métodos para a determinação da curva de retenção . . . . .	49
2.5.3	Condutividade hidráulica do solo . . . . .	53
2.5.4	Funções de condutividade hidráulica . . . . .	54
2.5.5	Equação para fluxo unidirecional em solos não saturados . . . . .	59
2.6	Balanço hídrico do solo . . . . .	60
2.7	Balanço de energia . . . . .	62
2.7.1	Evapotranspiração . . . . .	62
2.7.2	Radiação . . . . .	65
<b>Capítulo 3 Materiais, métodos e resultados preliminares . . . . .</b>		<b>70</b>
3.1	Área de estudo . . . . .	71
3.2	Condições climáticas simuladas . . . . .	72
3.2.1	Tratamento dos dados pluviométricos . . . . .	72
3.2.2	Tratamento dos dados de radiação solar . . . . .	74
3.2.3	Tratamento dos dados referentes à umidade relativa . . . . .	75
3.3	Solos utilizados na pesquisa . . . . .	78

---

3.3.1	Caracterização geotécnica . . . . .	79
3.3.2	Caracterização geotécnica da areia de duna . . . . .	80
3.3.3	Caracterização geotécnica do regolito . . . . .	81
3.3.4	Caracterização hidráulica dos solos . . . . .	82
3.3.5	Curva de retenção do regolito . . . . .	83
3.3.6	Curva de retenção da areia de duna . . . . .	85
3.3.7	Curvas de retenção dos solos . . . . .	86
3.3.8	Condutividade hidráulica . . . . .	87
3.4	Desenvolvimento experimental . . . . .	88
3.4.1	Canal de fluxo 2-D . . . . .	89
3.4.2	Tensiômetros de baixa e alta capacidade . . . . .	91
3.4.3	Sensores de umidade . . . . .	96
3.4.4	Sistemas de aquisição de dados . . . . .	98
3.4.5	Desenvolvimento do simulador de chuva . . . . .	99
3.4.6	Calibração do simulador solar . . . . .	103
3.5	Montagem e instrumentação do canal de fluxo simulando barreira capilar . . . . .	106
3.6	Montagem e instrumentação do canal de fluxo simulando barreira convencional . . . . .	110
3.6.1	Controle da temperatura e da umidade relativa . . . . .	113
<b>Capítulo 4</b>	<b>Resultados e análises . . . . .</b>	<b>115</b>
4.1	Primeiro ensaio . . . . .	115
4.2	Segundo ensaio . . . . .	119
<b>Capítulo 5</b>	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>127</b>
5.1	Conclusão geral . . . . .	127
5.1.1	Adaptação do canal hidráulico como canal de fluxo . . . . .	127
5.1.2	Simulador de chuva . . . . .	128
5.1.3	Simulador solar . . . . .	128
5.1.4	Controles da temperatura e da umidade relativa . . . . .	129

---

5.1.5	Respostas das instrumentações . . . . .	129
5.1.6	Comparação entre as diferentes configurações de barreiras . . . . .	129
5.1.7	Sugestões para pesquisas futuras . . . . .	130
<b>Apêndice A</b>	<b>Calibração dos demais FDR's . . . . .</b>	<b>140</b>
A.1	Continuação FDR's calibrados para a areia de duna . . . . .	140
A.2	Continuação FDR's calibrados para o rigolito . . . . .	141
<b>Apêndice B</b>	<b>Valores de umidade e sucção dos ensaios . . . . .</b>	<b>143</b>

# Lista de Figuras

1.1	Configuração do armazenamento de resíduos subterrâneos rasos instalado acima do nível freático. . . . .	25
2.1	Componentes básicos de um sistema final de cobertura. . . . .	28
2.2	Camada final do tipo barreira hidráulica. . . . .	31
2.3	Componentes de uma barreira hidráulica. . . . .	31
2.4	Componentes de um sistema de coleta de gás em aterros sanitários. Adaptado de Koerner e Daniel (1997) . . . . .	33
2.5	Conceito de armazenamento e esvaziamento usado para o projeto de coberturas alternativas. . . . .	37
2.6	Ilustração de uma barreira do tipo Evapotranspirativa. . . . .	38
2.7	Cobertura final do tipo barreira capilar . . . . .	39
2.8	Ilustração de sistemas de cobertura que utilizam barreiras capilares. . . . .	39
2.9	Esboço de uma camada de granulação fina sobrepondo uma camada de granulação grossa, ilustrando uma barreira capilar natural. . . . .	40
2.10	Relação hipotética entre condutividade hidráulica efetiva e potencial matricial para uma camada de granulação fina sobreposta a uma camada de granulação grossa. . . . .	40
2.11	Caracterização hidráulica de solos que formam uma barreira capilar. . . . .	41
2.12	Relação entre os parâmetros de retenção de umidade e a classe textural do solo. . . . .	43
2.13	Zonas de dessaturação definidas na curva de retenção do solo. . . . .	47
2.14	Ilustração do método da placa de sucção. . . . .	50
2.15	Ilustração do método da placa de pressão. . . . .	51
2.16	Tensiômetro de alta e de baixa capacidade. . . . .	53

2.17	Curvas propostas por Brooks & Corey 1964 para determinação da função de permeabilidade. . . . .	56
2.18	Ilustração do fluxo de água na superfície associado ao escoamento superficial. . . . .	61
2.19	espectro adaptado de palz. . . . .	66
2.20	Lâmpada de xenônio e o espectro solar ao nível do mar. . . . .	68
2.21	Lâmpada de argônio e o espectro solar ao nível do mar. . . . .	68
2.22	Lâmpada de vapor metálico e o espectro solar ao nível do mar. . . . .	69
3.1	Resumo metodológico. . . . .	70
3.2	Área de estudo - Semi árido . . . . .	71
3.3	Histograma de classes chuva horária das 4 estações. . . . .	73
3.4	Normal climatológica - Umidade Relativa, das estações estudadas em relação à Salvador - Período de 1981 à 2010. . . . .	76
3.5	Umidade relativa horária das quatro estações - Período de 2008 à 2018. . . . .	77
3.6	Média da umidade relativa horária das quatro estações - Período de 2008 à 2018. . . . .	77
3.7	Local da coleta do solo residual granulítico. . . . .	78
3.8	Local da coleta da Areia de Duna. . . . .	79
3.9	Curva granulométrica da areia de duna . . . . .	80
3.10	Curva granulométrica do regolito . . . . .	82
3.11	Carta de plasticidade do regolito . . . . .	82
3.12	Curva de compactação do regolito . . . . .	83
3.13	Câmara de pressão Machado e Dourado (2001), para ensaios de curvas de retenção. . . . .	84
3.14	Apresentação do Potenciômetro de Ponto de Orvalho. . . . .	85
3.15	Extração de amostra para o PPO . . . . .	85
3.16	Montagem de experimento para obtenção da curva de retenção da areia. . . . .	86
3.17	Curvas de retenção do Rigolito e da Areia de Duna . . . . .	86
3.18	Saturação dos corpos de prova para determinação da condutividade hidráulica do regolito . . . . .	87
3.19	Função de condutividade hidráulica da areia de duna e do regolito . . . . .	88

---

3.20	Ilustração dos principais elementos do canal de fluxo 2d com as suas respectivas dimensões e posições dos elementos. . . . .	89
3.21	Apresentação do canal de fluxo 2d completamente instrumentado. . . . .	90
3.22	Detalhe dos drenos de coleta superficial e do dreno de fundo. . . . .	91
3.23	Tensiômetro de baixa capacidade, a ser utilizado na instrumentação da areia de duna. . . . .	92
3.24	Tensiômetro MPS-6. . . . .	92
3.25	Tensiômetro de baixa capacidade sendo acoplado à coluna de água para aplicação de pressão . . . . .	93
3.26	Calibração dos Tensiômetros 5G e 7A. . . . .	93
3.27	Calibração dos Tensiômetros 9A e 13A. . . . .	94
3.28	Tentativa de calibração dos tensiômetros pelo método do equilíbrio de vapor. . . . .	95
3.29	Tentativa de calibração do MPS-6 . . . . .	95
3.30	Demonstração de contato entre o solo e o tensiômetro. . . . .	96
3.31	Sensor de umidade 5TE. . . . .	97
3.32	Calibração dos FDR's 1 e 2. . . . .	97
3.33	Calibração dos FDR's 6 e 7. . . . .	98
3.34	Data logger EM-50. . . . .	98
3.35	Montagem do simulador de chuva. . . . .	99
3.36	Curvas de calibração do simulador de chuva para um tempo de alimentação de 40min e uma altura de lâmina d'água de 0,2cm . . . . .	101
3.37	Curvas de calibração do simulador de chuva para um tempo de alimentação de 1h e 15min e uma altura de lâmina d'água de 0,2cm . . . . .	101
3.38	Multímetro e Piranômetro utilizados na calibração. . . . .	103
3.39	Reator e Lâmpada utilizados na calibração . . . . .	104
3.40	Visão geral do experimento. . . . .	104
3.41	Gráficos obtidos após calibração da lâmpada de vapor metálico. . . . .	105
3.42	Refletores posicionados. . . . .	105
3.43	Preparação do solo argiloso para o primeiro ensaio. . . . .	106
3.44	Acomodação das camadas de areia. . . . .	107

---

3.45	Primeiras camadas de areia sendo acomodada no canal. . . . .	107
3.46	Lançamento da primeira camada de solo fino, interface areia argila. . . . .	108
3.47	Mini compactador utilizado na camada de solo fino. . . . .	108
3.48	Instrumentação da camada de solo fino. . . . .	109
3.49	Instrumentação devidamente inserida na profundidade de 5 cm. . . . .	109
3.50	Vistas laterais do canal mostrando a compactação das camadas. . . . .	110
3.51	Inserção dos tensiômetros de baixa pressão. . . . .	110
3.52	Execução de reparos após o primeiro ensaio. . . . .	111
3.53	Preparação da amostra para o segundo ensaio. Secagem. . . . .	111
3.54	Amostras homogeneizadas para o segundo ensaio. . . . .	112
3.55	Saturação dos tensiômetros MPS-6 . . . . .	112
3.56	Instrumentação das camadas do segundo ensaio. . . . .	113
3.57	Dimensões da sala climatizada. . . . .	113
3.58	Instrumentação das camadas do segundo ensaio. . . . .	114
3.59	Termo higrômetro utilizado no monitoramento da umidade relativa e da temperatura na sala climatizada. . . . .	114
4.1	Perfil de umidade 1 - Ensaio 1. . . . .	115
4.2	Perfil de sucção 1 - Ensaio 1. . . . .	116
4.3	Localização das fissuras em relação aos perfis de sucção e umidade - Ensaio 1. . . . .	117
4.4	Perfil de umidade 2 - Ensaio 1. . . . .	117
4.5	Perfil de sucção 2 - Ensaio 1. . . . .	118
4.6	Balanço hídrico simplificado. . . . .	118
4.7	Fissuras mais relevantes ocorridas no primeiro ensaio. . . . .	119
4.8	Perfil de umidade 1 - Ensaio 2. . . . .	120
4.9	Perfil de sucção 1 - Ensaio 2. . . . .	121
4.10	Localização das fissuras em relação aos perfis de sucção e umidade - Ensaio 2. . . . .	121
4.11	Perfil de umidade 2 - Ensaio 2. . . . .	122
4.12	Perfil de sucção 2 - Ensaio 2. . . . .	122

---

4.13 Fissuras 1 e 2 - Período do dia 6 ao dia 15. . . . .	123
4.14 Fissura 3 - Período do dia 6 ao dia 15. . . . .	124
4.15 Fissura 5 - Período do dia 6 ao dia 15. . . . .	124
4.16 Fissura 5 - Período do dia 6 ao dia 15. . . . .	125
4.17 Apresentação de parte notada da fissura 4. . . . .	126
4.18 Balanço hídrico simplificado - Ensaio 2. . . . .	126
A.1 Calibração dos FDR's 3 e 4. . . . .	140
A.2 Curvas de calibração dos FDR's 8 e 9. . . . .	141
A.3 Curvas de calibração dos FDR's 10 e 11. . . . .	141
A.4 Curvas de calibração dos FDR's 12 e 13. . . . .	142
A.5 Curvas de calibração dos FDR's 14 e 15. . . . .	142

# Lista de Tabelas

2.1	Impacto da gestão do lixiviado no recalque de coberturas de aterros de resíduos sólidos municipais <sup>(1,2)</sup> . . . . .	34
2.2	Composição de algumas coberturas reportadas na literatura. . . . .	36
2.3	Valores representativos de teores de umidade para solos de diferentes texturas. . . . .	44
3.1	Coordenadas das estações meteorológicas estudadas. . . . .	71
3.2	Frequência e frequência relativa para diferentes intervalos de precipitação. . . . .	72
3.3	Precipitação horária vs. Porcentagens anuais de chuva. . . . .	73
3.4	Distribuição mensal das chuvas simuladas. . . . .	74
3.5	Acumulado Mensal por Ano - Remanso $-W/m^2$ . . . . .	74
3.6	Acumulado Mensal por Ano - Remanso $-W/m^2$ . . . . .	75
3.7	Radiação média horária das Estações Meteorológicas . . . . .	75
3.8	Caracterização física dos solos . . . . .	80
3.9	Índices físicos da areia de duna. . . . .	81
3.10	Comparação entre os valores de massa específica seca e umidade entre as pesquisas realizadas no Geoamb. . . . .	81
3.11	Valores de $k_s$ para o regolito. . . . .	88
3.12	Valores de $k_s$ para areia de duna. . . . .	88
3.13	Valores de sucção osmótica para diferentes concentrações de NaCl . . . . .	95
3.14	Valores médios referentes a seis curvas de precipitação 28 mm/h e seus respectivos valores de desvios padrões em relação à média. . . . .	100
3.15	Valores médios referentes a seis curvas de precipitação 72 mm/h e seus respectivos valores de desvios padrões em relação à média. . . . .	102

B.1	Dados do perfil de umidade 1 - Ensaio 1. . . . .	143
B.2	Dados do perfil de sucção 1 - Ensaio 1. . . . .	146
B.3	Dados do perfil de umidade 2 - Ensaio 1. . . . .	148
B.4	Dados do perfil de sucção 2 - Ensaio 1. . . . .	151
B.5	Dados do perfil de umidade 1 - Ensaio 2. . . . .	154
B.6	Dados do perfil de sucção 1 - Ensaio 2. . . . .	156
B.7	Dados do perfil de umidade 2 - Ensaio 2. . . . .	158
B.8	Dados do perfil de sucção 2 - Ensaio 2. . . . .	160

# Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CCL	Compacted Clay Line
CP	Corpo de Prova
CETESB	Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental
ET	Evapotranspirativa
FDR	Reflectometria no Domínio da Frequência
GEOAMB	Laboratório de Geotecnia Ambiental
GM	Geomembranas
GT	Geotêxtil
IP	Índice de Plasticidade
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LaPO	Laboratório de Propriedades Ópticas
LabMin	Laboratório de Microclima e Modelagem
<i>M</i>	Molalidade
PPO	Potenciômetro de Ponto de Orvalho
PVC	Policloreto de Vinila
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UCSAL	Universidade Católica do Salvador
UFBA	Universidade Federal da Bahia
UTM	Universal Transversa de Mercator
WMO	World Meteorological Organization

# Lista de Símbolos

$CR$	Capacidade de retenção
$CR_{Fo}$	Capacidade de armazenamento de água por uma barreira capilar
$CR_{Fc}$	Capacidade de armazenamento efetivo da camada de solo fino
$CR_R$	Capacidade de retenção requerida
$\delta$	Constante empírica para função de permeabilidade
$e$	Índice de vazios do solo
$ET_p$	Evapotranspiração potencial
$g$	Aceleração da gravidade
$G$	Fluxo de calor no solo
$H$	Fluxo de calor sensível
$i$	Gradiente hidráulico do solo
$I$	Infiltração
$k$	Condutividade Hidráulica do solo
$k_s$	Condutividade hidráulica saturada do solo
$k_w$	Condutividade hidráulica à água
$Le$	Fluxo de calor latente
$L$	Desvio Lateral
$L_f$	Espessura de solo fino
$LL$	Limite de Liquidez
$\mu_w$	Viscosidade absoluta da água
$\omega_v$	Massa molecular do vapor de água
$P$	Precipitação
$P_f$	Percentual de finos
$q$	Vazão
$r$	Escoamento superficial
$R_n$	Radiação líquida
$R$	Constante universal dos gases
$RH$	Umidade Relativa
$\rho$	Massa específica aparente do solo
$\rho_d$	Massa específica seca do solo
$\rho_s$	Massa específica dos sólidos
$\rho_w$	Massa específica da água
$\lambda$	Inclinação da curva de retenção do solo
$\psi$	Sucção do solo
$\psi_b$	Valor de entrada de ar
$\psi_r$	Sucção residual
$S_r$	Grau de saturação

$S_e$	Grau de saturação efetivo
$T_K$	Temperatura absoluta do gás
$\theta$	Umidade volumétrica
$\theta(\psi)$	Umidade correspondente à $\psi$
$\theta_{wp}$	Umidade volumétrica no ponto de murcha do solo
$\theta_{fc}$	Umidade volumétrica na capacidade de campo do solo
$\theta_r$	Umidade volumétrica residual
$\theta_s$	Umidade volumétrica na saturação
$\theta_{sc}$	Capacidade de armazenamento do solo
$u_v$	Pressão parcial do vapor de água no ar
$u_{v0}$	é pressão de saturação do vapor de água
$v$	Velocidade de descarga
$z$	Profundidade
$z_s$	Espessura da camada de solo
$z_w$	Profundidade de água que pode ser armazenada no solo

# Capítulo 1

## Introdução

Os sistemas de disposição de resíduos em terra são reconhecidos como uma das principais obras geotécnicas com a finalidade de controle ambiental. Sua principal função é controlar os impactos potenciais, com base no estudo dos fluxos de massa que o atravessam e na análise da estabilidade física do conjunto. O aterro sanitário é a disposição final ambientalmente adequada para a distribuição dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Ele deve apresentar, entre outros requisitos mínimos estabelecidos pela legislação ambiental, uma cobertura final que reduza a infiltração de água e a emissão de odores e de gases de efeito estufa, além de propiciar um ambiente anaeróbio adequado para a geração de metano, gás de grande poder calorífico, o qual pode ser utilizado como combustível em diferentes configurações de aproveitamento energético, e cuja queima reduz o impacto da emissão de gases de efeito estufa.

Um dos principais elementos da construção de um aterro sanitário é a camada de cobertura final. Este elemento é importante, pois é responsável pelo controle da entrada de líquidos no interior da massa do aterro sanitário. Isso, em consequência, influi diretamente na geração de lixiviado, que, por sua vez, exerce influência nos custos de tratamento durante a operação e após o fechamento do aterro sanitário. Normalmente, no Brasil, uma camada de solo compactado argiloso, de baixa permeabilidade, é usada para construção das camadas de cobertura diária e final. Apesar de seu desempenho regular, solos argilosos apresentam trincas e ressacamento devido a ocorrência de ciclos de secagem/umedecimento, o que acarreta a sua perda de eficiência a longo prazo, principalmente em regiões de clima árido ou semi-árido.

Diversos estudos de configurações de cobertura têm sido desenvolvidos para minimizar a geração de lixiviado, e, em estudos mais recentes, para controlar a emissão de gases fugitivos, principalmente o metano, que possui um potencial de aquecimento global cerca de 21 vezes maior que o gás carbônico. Para tanto, é necessário compreender os mecanismos de interação cobertura-atmosfera, principalmente se esse sistema é constituído por materiais argilosos submetidos a ciclos de umedecimento e secagem (MATEUS, 2008).

Por conta disso, diversos estudos têm sido realizados para a confecção de barreiras alternativas, que tirem vantagem não só de uma baixa permeabilidade do solo, mas de sua capacidade de armazenamento provisório de água e da ocorrência de processos evapotranspirativos em superfície. Uma configuração de cobertura que tem gerado resultados bem positivos nesse sentido é aquela que utiliza o conceito de barreira capilar. Tratam-se de

coberturas evapotranspirativas constituídas de uma camada de solo fino (silte, argila) onde a água da chuva que infiltra fica armazenada, e uma segunda camada de material granular (areia, pedregulho, geotêxtil não tecido) que impede a passagem de água infiltrada para o depósito de resíduo sólido. A primeira camada retém parte da água da chuva que posteriormente é liberada para atmosfera por evaporação/transpiração.

O uso de barreiras capilares evita o fluxo descendente de água para o resíduo, além de manter graus de saturação elevados na camada argilosa que dificultam o fluxo ascendente de gases. O entendimento do funcionamento de uma barreira capilar é fundamentado em conceitos da mecânica dos solos não saturados pois seu desempenho é sensível às variações do clima, que por sua vez controlam os teores de umidade de equilíbrio do solo em superfície. Por se tratar de conceito relativamente recente e com o intuito de entender o seu comportamento e modelar os perfis de sucção, temperatura e umidade do solo, a partir de dados meteorológicos de fácil medição em campo, vêm crescendo o número de pesquisas que tratam da interação solo-atmosfera e propõem modelos físico-matemáticos para tratar do fenômeno (CUI et al., 2005).

Há algumas décadas, a busca por uma maior eficiência das camadas finais de aterros, por meio de uma solução que prolongue o tempo de vida útil do aterro e garanta seu bom funcionamento à um baixo custo, vem ganhando destaque. O interesse pelas barreiras capilares, em especial, pode ser verificado por meio das inúmeras pesquisas, utilizando-se de diferentes metodologias, que vêm sendo conduzidas ao longo dos últimos 35 anos.

Em meados da década de 80, Yeh, Gelhar e Gutjahr (1985) realizou uma análise estocástica do fluxo não saturado em solos heterogêneos, por meio de experimentos laboratoriais e observação tomadas em campo, sem necessariamente estar focado nos fenômenos relacionados ao comportamento de barreiras capilares, estes autores observaram que podiam tomar vantagem do contraste existente entre as propriedades hidráulicas dos materiais (solos finos/solos grossos). Conforme se pode observar na Figura 1.1, devido ao contraste nas condutividades hidráulicas não saturadas entre as duas camadas, a água se mantinha confinada no material de textura mais fina. A interface inclinada gera um gradiente hidráulico no material mais fino e forma uma espécie de "guarda chuva" protetor para o resíduo. Os autores sugerem ainda que ao invés de se utilizar nas camadas superiores apenas solo fino, uma mistura de camadas de materiais finos e grossos seja aplicada.

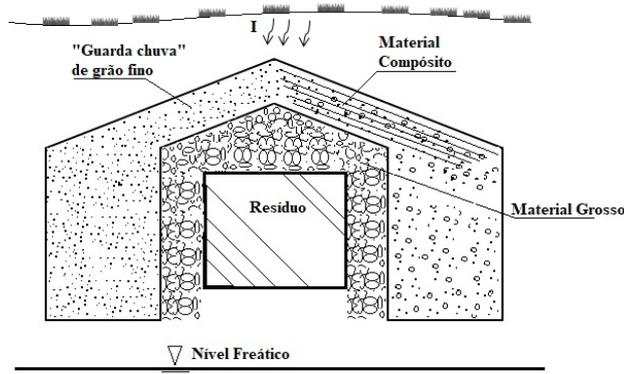
Anos mais tarde, Ross (1990) e Kämpf e Montenegro (1997) avaliaram a capacidade de desvio das barreiras capilares em superfície inclinada. Até então, as variáveis que intrigavam os pesquisadores eram apenas as funções de condutividade hidráulica dos materiais envolvidos na camada e o ângulo de assentamento delas.

Dando continuidade à abordagem não saturada no fluxo em meios não saturados, alguns autores como, Stormont (1996), Webb (1997), Stormont e Anderson (1999), Khire, Benson e Bosscher (2000), começam a considerar o efeito direto da evaporação e da transpiração no aumento da eficiência das barreiras, fazendo com que as barreiras capilares comesçassem a se consolidar como uma alternativa de cobertura para instalações de disposição de resíduo, especialmente em regiões de clima seco.

Estudos em larga escala (*in situ* e a longo prazo) foram fundamentais, não somente para uma elucidação do fenômeno físico, mas também porque trouxeram luz, à respeito da sua

Figura 1.1: Configuração do armazenamento de resíduos subterrâneos rasos instalado acima do nível freático.

Fonte: adaptado de Yeh, Gelhar e Gutjahr (1985).



viabilidade técnica e financeira, além de avaliar a sua confiabilidade construtiva. Um dos primeiros trabalhos encontrados nessa linha foi o de Dwyer (1998), que realizou um estudo comparativo de seis diferentes alternativas de coberturas finais, avaliando suas eficiência em ambientes secos associados aos seus respectivos custos de implementação. Já Abdolazadeh, Vachon e Cabral (2011) instrumentou uma célula experimental no aterro de *Saint-Tite-des-Caps*, Quebec, Canadá.

A eficiência de barreiras capilares também foi observada por meio de experimentos laboratoriais, como pode ser encontrado nos trabalhos de Vieira (2005), Tidwell et al. (2003), Oliveira e Marinho (2007), Tami et al. (2004), Silva (2011), Zhan et al. (2014), e também utilizando ferramentas numéricas como nas pesquisas de Webb (1997), Morris e Stormont (1999), Parent e Cabral (2006), Aubertin et al. (2009), Li et al. (2013), Ng et al. (2015).

Trabalhos mais recentes abordam questões referentes à aplicação de materiais alternativos na construção das barreiras capilares. Uns buscaram a utilização do próprio RSU como material construtivo, à exemplo dos trabalhos desenvolvidos por Almeida (2011) e Izzo, Mahler e Rose (2013). Outros buscaram avaliar e compreender melhor a interação na interface solo/geossintéticos como Trovatto (2014) e Lima (2014).

Com diferentes focos, utilizando-se de diferentes métodos, as pesquisas supracitadas, buscaram avaliar o desempenho de barreiras capilares. Nota-se no entanto que faltam pesquisas que avaliem a eficiência das coberturas finais de aterro em ambientes controlados, ou seja, controlando e simulando variáveis atmosféricas relevantes ao estudo, (i.e. radiação, evaporação, precipitação). Isto permite que múltiplas condições sejam investigadas e que comparações entre diferentes configurações de cobertura final de aterro sejam realizadas.

Com o objetivo de sanar esta carência de estudos de fluxo 2D aplicados à solos brasileiros utilizados em soluções de camadas finais de aterro, neste trabalho buscou-se avaliar o desempenho dessas barreiras em ambiente laboratorial considerando a interação entre a superfície exposta da barreira e a atmosfera.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho de diferentes camadas de cobertura de aterro (barreira capilar e barreira resistiva) em canal de fluxo 2D, submetidas a condições intempéricas similares à do semiárido brasileiro, controladas em laboratório.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Construir um canal de fluxo 2D instrumentado que permita avaliar o desempenho de camadas de cobertura sob condições intempéricas controladas em laboratório;
- Construir uma sala climatizada capaz de simular as diferentes intempéries a que se possa expor as camadas finais de aterro;
- Caracterizar as diferentes variáveis climáticas que serão simuladas em laboratório;
- Desenvolver simuladores solar e pluviométrico adequados às características do canal de fluxo;
- Comparar o desempenho da barreira capilar com o de uma barreira resistiva de referência;
- Avaliar o desempenho da instrumentação empregada e sua adequabilidade ao estudo experimental a ser desenvolvido.

# Capítulo 2

## Revisão bibliográfica

### 2.1 Sistemas de cobertura de aterros sanitários

A cobertura final de um aterro de resíduos deve ter um desempenho que assegure a proteção à saúde humana e ao meio ambiente, reduzindo os impactos através da eliminação de vetores de doenças e redução da exalação de odores, a redução da infiltração de água de chuva no aterro, redução do fluxo de gases e da erosão e recomposição da paisagem, além de ter capacidade de suporte para permitir acesso e movimentação na superfície (CATAPRETA, 2008).

Suas propriedades e critérios de projeto dependem de características geotécnicas do material utilizado e do clima da região em que o aterro se localiza, além das diretrizes da gestão e dos gastos definidos para a unidade. Desta forma, não há um padrão de construção de sistemas de cobertura e, mesmo havendo uma classificação de acordo com a concepção e objetivo principal dos tipos reportados na literatura, cada projeto é único, o que torna necessário o estudo para cada localidade.

### 2.2 Componentes gerais de sistemas de cobertura de aterros sanitários

Os principais objetivos da maioria dos sistemas de camadas sobre resíduos sólidos são a prevenção da percolação de lixiviado para as camadas subjacentes e a prevenção e captura de gases poluentes que escapam para atmosfera. Sistemas finais de cobertura para aterros de resíduos sólidos urbanos, aterros de resíduos perigosos e projetos de ações corretivas (incluindo lixões abandonados), têm uma série de elementos bastante similares (KOERNER; DANIEL, 1997).

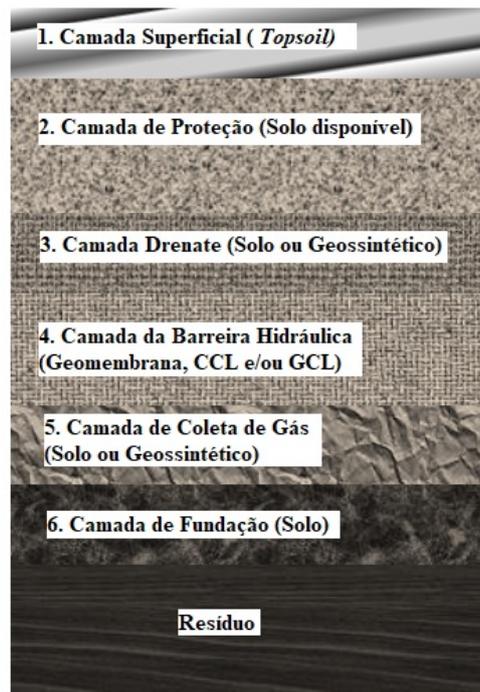
A Figura 2.1 ilustra os componentes básicos de um sistema final de cobertura, a saber:

1. Camada superficial;
2. Camada de Proteção;

3. Camada de Drenagem;
4. Camada da Barreira Hidráulica;
5. Camada de Coleta de gás; e
6. Camada de Fundação/regularização.

Figura 2.1: Componentes básicos de um sistema final de cobertura.

Fonte: adaptado de Koerner e Daniel (1997)



Nem todos os componentes são necessários em todas as soluções de cobertura final. Como exemplo, uma camada drenante não é necessária em um sistema de cobertura localizado numa região do semi-árido. Da mesma forma, a coleta de gás pode ser requisitada em algumas soluções e em outras não, dependendo da produção de gases do resíduo ou material contaminado que demandem coleta e gerenciamento.

As camadas supracitadas podem ser combinadas, por exemplo, a camada superficial e de proteção são frequentemente combinadas em uma única camada que forma o solo de cobertura. Da mesma forma, a camada coletora de gás (quando executada em areia) combina-se geralmente com a camada de fundação (KOERNER; DANIEL, 1997).

### 2.2.1 Camada superficial

O material que comumente é utilizado nesta camada é um *topsoil* fértil. Por ser bem vegetada ajuda a minimizar o efeito da erosão e promove o retorno da água para atmosfera por meio da evapotranspiração. A vegetação também cria uma cobertura de folhas acima do solo que reduz o impacto e diminui o efeito do vento na superfície do solo.

As principais preocupações de uma camada superficial de solo estão relacionados ao início do crescimento da vegetação, particularmente em épocas do ano em que as condições de crescimento das plantas são desfavoráveis e a vulnerabilidade ao vento ou à erosão, se o crescimento vegetativo não for adequado e ser seguido por um período de seca. Muitas vezes, o solo superficial é o componente mais caro de um sistema de cobertura devido à alta demanda e baixa disponibilidade. A erosão pode ser controlada temporariamente colocando um material geossintético na superfície. Tais materiais são comumente usados em taludes expostos às intempéries próximos a rodovias e mantêm o solo no local até que a vegetação possa ser estabelecida (KOERNER; DANIEL, 1997).

### **2.2.2 Camada de proteção**

A camada de proteção pode atender a uma ou mais das seguintes funções:

1. Armazenar a água que infiltra, até que seja removida posteriormente por evapotranspiração;
2. Separar fisicamente os componentes de drenagem e a barreira hidráulica subjacentes de animais e raízes de plantas;
3. Minimizar a possibilidade de acesso humano ao material contaminado;
4. Proteger as camadas subjacentes contra o excesso de umedecimento/secagem (que pode causar rachaduras em solos de granulação fina).

O solo disponível no local é o material mais comumente usado para a camada de proteção. Às vezes, as camadas de superfície e proteção são construídas com o mesmo material e são combinadas em uma única camada de solo de cobertura.

A camada de proteção pode ser muito eficaz no armazenamento de água para evapotranspiração posterior. Se a camada de proteção for colocada diretamente sobre a barreira hidráulica, pode ser formado um plano de deslizamento potencial em sua interface. O risco de instabilidade será particularmente agudo após períodos prolongados de chuva se não for fornecida nenhuma camada de drenagem abaixo da camada de proteção (KOERNER; DANIEL, 1997).

### **2.2.3 Camada de drenagem**

A camada de drenagem é frequentemente colocada abaixo da camada de proteção e acima da barreira hidráulica. Existem três razões pelas quais uma camada de drenagem pode ser desejável:

1. Reduzir a carga de água na camada de barreira, minimizando assim a infiltração;
2. Drenar a camada de proteção sobreposta, aumentando assim a capacidade de armazenamento da água; no entanto, isso também pode ter um efeito deletério se secar o solo sobrejacente até o ponto onde a vegetação não floresce;

3. Reduzir e controlar as pressões da água dos poros no solo da cobertura e, assim, melhorar a estabilidade do talude.

A terceira razão citada acima é frequentemente a mais importante. Em áreas que recebem chuva suficiente para encharcar a camada de proteção a uma profundidade significativa, uma camada de drenagem é essencial para manter a estabilidade da cobertura.

Em áreas áridas ou em porções relativamente planas de sistemas de cobertura final, uma camada de drenagem pode ou não ser necessária, dependendo dos requisitos específicos do local. A seleção do tipo de material de drenagem é geralmente baseada na disponibilidade de materiais locais, economia e vida útil do projeto. O material mais comumente usado é a areia, embora o cascalho às vezes seja usado se for necessária uma alta transmissibilidade hidráulica ou se o cascalho for mais abundante na região. Os geossintéticos (geonets e geocompostos) também são frequentemente usados, e materiais alternativos, como pneus triturados, têm sido usados ocasionalmente.

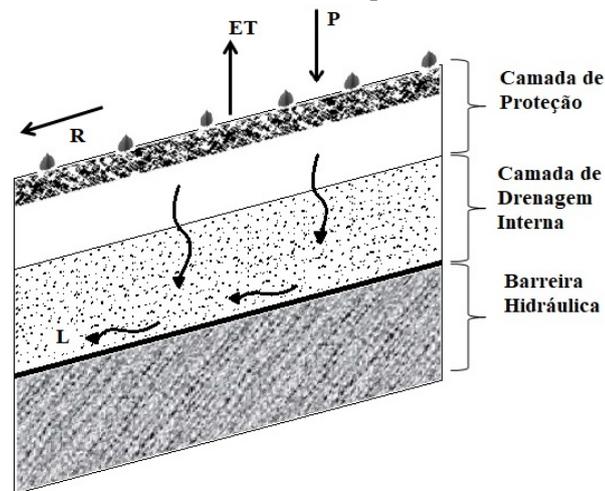
Como a camada de drenagem geralmente está subjacente à camada de proteção do solo, filtração adequada deve ser fornecida para que as partículas mais finas da camada de proteção não migrem para a camada de drenagem e causem a sua colmatagem. A camada de filtro pode ser constituída de solo, mas é mais frequentemente um geotêxtil. Se a camada de drenagem contiver objetos grandes (por exemplo, pedras) ou objetos pontiagudos (por exemplo, arame de reforço em pneus triturados), existe o risco de perfuração de uma geomembrana subjacente, atuando como barreira hidráulica. Se a punção for um problema, uma camada de proteção entre a camada de drenagem e a barreira hidráulica pode ser necessária. Controlar a descarga de água da camada de drenagem é um detalhe importante. Deve-se permitir que a água descarregue livremente da camada de drenagem na base do sistema de cobertura, através do que é frequentemente chamado de dreno do pé (KOERNER; DANIEL, 1997).

## 2.2.4 Barreira hidráulica

A barreira hidráulica pode ser encarada como a principal camada de uma cobertura final de um aterro sanitário. É dela a função de impedir o ingresso da água de chuva ou a saída do biogás do aterro na forma de emissões fugitivas. É aí também que ocorrem as principais variações de tipos de cobertura, como as que serão discutidas neste trabalho. As barreiras hidráulicas podem ser simples (camada de solo argiloso compactado) ou compostas (uso de elementos impermeabilizantes extras). Os materiais comumente utilizados para a confecção da barreira hidráulica são as geomembranas (*GM*), o solo natural compactado (*compacted clay liner - CCL*) ou a combinação desses materiais. A Figura 2.2 ilustra o funcionamento de uma barreira hidráulica.

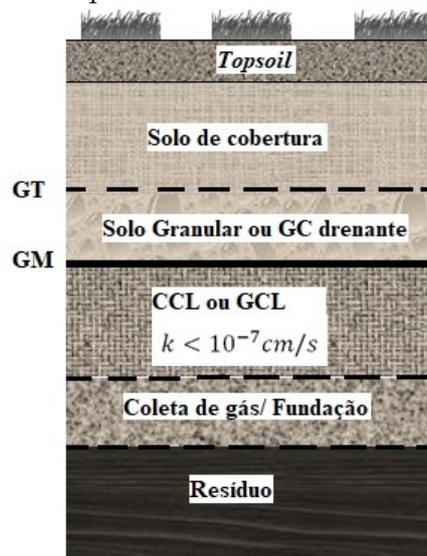
As geomembranas (*GM*) são mantas contínuas e flexíveis constituídas de um ou mais materiais sintéticos. Elas possuem baixíssima condutividade hidráulica e são amplamente utilizadas como barreiras hidráulicas em sistemas de cobertura, devido à sua estrutura não porosa, à sua flexibilidade e à facilidade de instalação. Dentre as vantagens da utilização de *GM* em camadas impermeáveis destacam-se a permeabilidade extremamente baixa e a possibilidade de absorver pequenas deformações. Como desvantagens destacam-se a possibilidade de vazamentos causados por imperfeições ocasionais na *GM*, possibilidade de deslizamento

Figura 2.2: Camada final do tipo barreira hidráulica.



na interface entre a *GM* os materiais adjacentes, e, para algumas aplicações, incertezas sobre o tempo de vida útil da *GM* (BONAPARTE; DANIEL; KOERNER, 2002). A Figura 2.3 ilustra os componentes supracitados e algumas das suas características.

Figura 2.3: Componentes de uma barreira hidráulica.



De acordo com Bonaparte, Daniel e Koerner (2002), nos Estados Unidos, de acordo com a legislação federal, as *CCL* são construídas primariamente a partir de solos naturais ricos em argila, embora possam conter também materiais processados, como bentonita. Devem apresentar condutividade hidráulica inferior a  $1 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , no caso de aterro de resíduos perigosos, e inferior a  $1 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , quando se tratar de aterros de resíduos sólidos urbanos. Para que estas características sejam atingidas, normalmente é recomendado o uso de solo com as seguintes características:

- percentual de finos,  $P_f$ , (partículas passando na peneira no #200 (0,075 mm de abertura)  $30 \leq P_f \leq 50\%$ ;

- índice de plasticidade,  $7 \leq IP \leq 15\%$ ; e
- máximo de cascalho (partículas retidas na peneira #4 (4,76 mm de abertura))  $\leq 20 - 50\%$ .

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, em sua norma NBR 13896, ABNT (1997), não apresenta um detalhamento sobre o sistema de cobertura final de aterros sanitários, destacando apenas que seu projeto deve minimizar a infiltração de água na célula, exigir pouca manutenção, não estar sujeita a erosão, acomodar assentamentos sem fratura e possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro. De acordo com CETESB (1993), o solo mais indicado para construção das camadas impermeabilizantes é o argiloso, devendo atender às seguintes características:

- solo classificado como CL, CH, SC ou OH, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos;
- no mínimo 30% de partículas com diâmetro inferior a 0,075 mm (passante na peneira no 200);
- coeficiente de permeabilidade à água,  $k_w \leq 10^{-9}$  m/s;
- Limite de liquidez,  $LL \geq 30\%$ ;
- $IP \geq 15\%$ ;
- $pH \geq 7$ .

### 2.2.5 Camada de Coleta de gás

Esta camada tem o propósito de coletar os gases oriundos da decomposição anaeróbica e aeróbica de resíduos orgânicos. Os materiais que geralmente compõem esta camada são areia, cascalho, geotêxtil, geocompósito ou outro material capaz de ser transmissor de gás. O gás é capturado na camada de coleta de gás e flui a partir dele para tubos ou aberturas de coleta.

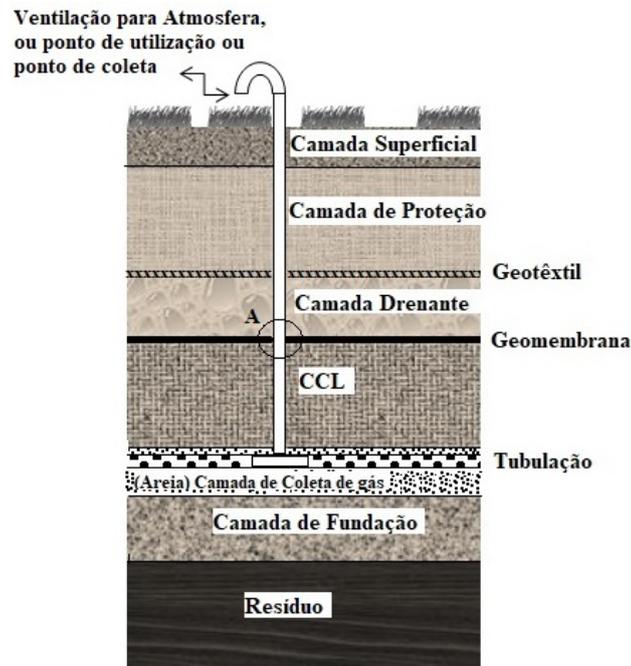
O fluxo de gás pode ocorrer passivamente sob o gradiente de pressão natural dentro do corpo do aterro ou pode fluir ativamente através da assistência de um sistema à vácuo situado na superfície.

Uma camada de coleta de gás é necessária para os resíduos sólidos que produzem gases ou voláteis que devem ser tratados ou liberados de maneira controlada. Trata-se de uma camada que deve ter uma alta transmissibilidade e que necessita de atenção constante para evitar obstrução causada por migração de materiais mais finos. Dessa maneira, é comum a utilização de filtros para impedir a ocorrência dessas obstruções.

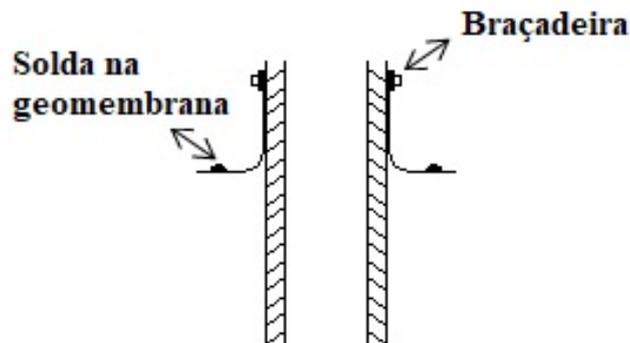
Uma vez assentada, a camada de drenagem de gás deve permitir o livre movimento dos gases para os tubos de coleta ou pontos de saída. A camada de ventilação, bem como sua saída, devem ser projetadas para minimizar a ocorrência de "brechas" nas camadas sobrejacentes, pois, a infiltração de líquidos pode acarretar em prejuízos à funcionalidade e eficiência

da camada. Os componentes de um sistema de coleta de gás são ilustrados na Figura 2.4(a), a ilustração da medida mitigadora da migração de líquidos para a camada de coleta de gás é apresentada na Figura 2.4(b).

Figura 2.4: Componentes de um sistema de coleta de gás em aterros sanitários.  
Adaptado de Koerner e Daniel (1997)



(a) Ilustração de um sistema de coleta de gás.



(b) Ilustração da soldagem na geomembrana, Detalhe A.

## 2.2.6 Camada de fundação/regularização

A camada de fundação está localizada imediatamente acima da camada de resíduos. É constituída geralmente da cobertura provisória que já foi colocada, eventualmente, com algum grau de compactação, antes da cobertura final ser construída. Caso a cobertura provisória não tenha sido aplicada, ou, caso tenha sido aplicada, mas, seja muito fina, ou, caso após a sua aplicação tenha-se tido como resultado uma superfície irregular, uma camada de

solo deve ser espalhada e compactada para compor a camada de fundação ou regularização. O greide final da camada de fundação deve levar em conta o recalque gerado pelo assentamento da camada de cobertura. Como mostra a Tabela 2.1, estes recalques podem representar de 10% à 20% da espessura dos resíduos para aterros sanitários municipais (KOERNER; DANIEL, 1997).

Tabela 2.1: Impacto da gestão do lixiviado no recalque de coberturas de aterros de resíduos sólidos municipais<sup>(1,2)</sup>

Fonte: adaptado de Koerner e Daniel (1997)

Prática de gestão de lixiviado	Recalque Total		Recalque Diferencial <sup>(3)</sup>	
	Quantificação	Tempo	Quantificação <sup>(4)</sup>	Tempo
Tratamento padrão do lixiviado	10% - 20%	≤ 30 anos	Baixo a Moderado	≤ 20 anos
Recirculação de lixiviado	10% - 20%	≤ 15 anos	Moderado a Alto	≤ 10 anos
Lixões, Aterros abandonados	acima de 30%	>30 anos	Desconhecido	>20 anos

(1)Aterros de resíduos perigosos, resíduos industriais, ou incineradores de cinzas, têm valores muito menores de recalque, do que os quantificados nessa tabela;

(2)As estimativas apresentadas nessa tabela sobre o impacto da gestão do lixiviado no recalque de coberturas finais de aterro são baseadas em dados pontuais. Estes dados devem ser apenas um guia e se fazem necessárias estimativas específicas do local para desenvolver um número mais realista que atenda aos requisitos do projeto de cobertura final de aterro que se deseja implantar;

(3)As estimativas nesta tabela à respeito do recalque diferencial também são baseadas em dados pontuais por isso dados monitorados em campo fazem-se necessários;

(4)Esses termos de avaliação qualitativa são afetados pela densidade do resíduo. Resíduos bem compactados produzem recalques diferenciais menores que resíduos mal compactados

A camada de fundação é considerada crítica para a definição do greide, tendo em vista a sobreposição das camadas finais que serão assentadas posteriormente. O procedimento de compactação demanda, de maneira usual, a presença de equipamentos como os rolos compactadores.

## 2.3 Coberturas resistivas ou convencionais

As coberturas tradicionais de aterro sanitário, têm por princípio o isolamento do resíduo das condições ambientais externas. Dessa forma, camadas "impermeáveis" são dispostas de forma a gerar uma barreira resistiva, como também são conhecidas as coberturas convencionais, que atuam sempre objetivando a redução da infiltração de água de chuva para camada de resíduo e a restrição da liberação de gases para a atmosfera.

Essas camadas são compostas por uma camada vegetativa, que é comum a todos os casos, solos de baixa condutividade hidráulica, ou solos com diferentes graduações, compactados e com espessura variável, além da possibilidade do uso associado de geossintéticos, como as GM. Cada elemento do sistema é dotado de uma especificação, tanto quanto às suas funções, quanto às suas espessuras. Para a execução da camada impermeabilizante, deve-se verificar a possibilidade de uso de materiais de empréstimo disponíveis nas proximidades do aterro, assim como a disponibilidade dos materiais geossintéticos.

As barreiras resistivas têm apresentado bons resultados quando as condições climáticas são mais estáveis, com estações do ano bem definidas, em ambientes com clima úmido, onde há um excesso de precipitação em relação à evaporação, contribuindo para manter a barreira hidráulica sempre saturada ou próxima da saturação. A baixa condutividade hidráulica da cobertura mitiga a migração de água para o interior do aterro, e o excesso de precipitação é convertido em escoamento superficial. No entanto, quando em regiões de clima semi-árido, árido, ou em locais cujos os períodos de seca se apresentam mais extensos, fissuras por retração devido ao ressecamento da cobertura tendem a aumentar a condutividade hidráulica do sistema, prejudicando em muito a eficácia da barreira resistiva (MCCARTNEY; ZORNBERG, 2002).

Como supracitado, os sistemas de coberturas impermeáveis são dimensionados para assegurar uma baixa condutividade hidráulica. No entanto, o acesso a materiais que atendam às especificações e regulamentações vigentes nem sempre é possível. Além disto, os materiais argilosos, normalmente indicados, apresentam elevado potencial de fissuração, podendo aumentar a condutividade hidráulica da cobertura a longo prazo. Por essas razões a busca por soluções e materiais alternativos que possibilitem melhorar o desempenho das camadas de cobertura, aliado a ganhos econômicos e ambientais, tem crescido com o passar dos anos.

Em seu trabalho, Damasceno (2018) apresenta um compêndio de trabalhos encontrados na literatura que estudaram barreiras resistivas. A Tabela 2.2 apresenta soluções em barreiras resistivas aplicadas no Brasil e em outros países, e especifica os materiais que compõem a camada e suas respectivas espessuras.

## 2.4 Coberturas alternativas

As coberturas alternativas são sistemas que fazem uso da capacidade de retenção do solo, da evaporação e da evapotranspiração para produzir uma cobertura econômica e eficiente para aterros de resíduos em geral. Dois tipos de coberturas alternativas podem ser definidos: as evapotranspirativas (ET); e as barreiras capilares, sendo que as barreiras capilares podem também funcionar como Evapotranspirativas.

Estas coberturas são chamadas de alternativas, pois, no início de sua aplicação eram uma "alternativa" às coberturas finais de argila. Estes sistemas de cobertura são também conhecidos como coberturas *store-and-release*. O projeto de engenharia de um sistema de cobertura do tipo *store-and-release* envolve a aplicação dos princípios da mecânica dos solos não saturados. A Figura 2.5 apresenta o conceito do armazenamento e esvaziamento utilizado em projetos de coberturas alternativas (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012).

Tabela 2.2: Composição de algumas coberturas reportadas na literatura.

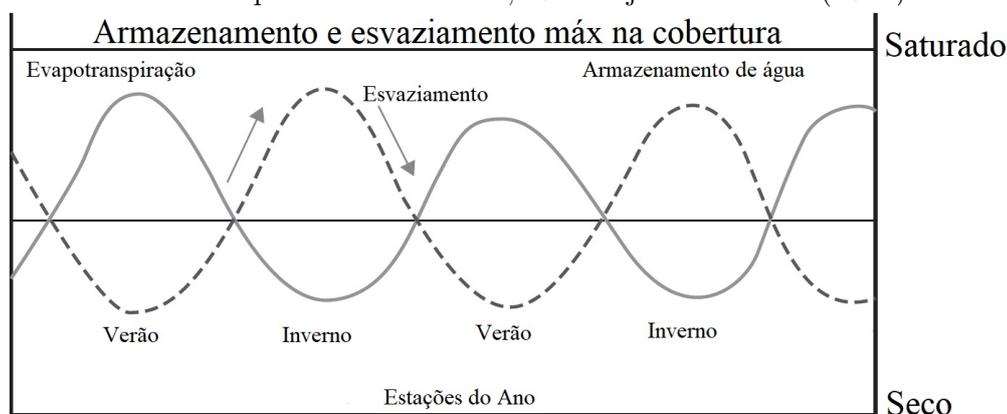
Fonte: modificado de Damasceno (2018)

Referência	Aterro (encerramento)	Composição da cobertura
(CAPACCIONI et al., 2011)	Aterro Fano (Itália), Seção I (1996)	Uma camada de argila não compactada abaixo de uma camada de argila compactada, uma camada drenante de geotêxtil e uma camada de solo orgânico.
(SCHEUTZ et al., 2011)	Aterro AV Miljø (Dinamarca), Célula 1.3 (2001)	Uma camada de cascalho (esp: 20 cm) abaixo de um solo argiloso (esp: 1,0 m) e solo orgânico (esp: 20 cm).
(SCHEUTZ et al., 2011)	Aterro Fakse (Dinamarca), Seção I (1997)	Uma camada de solo argiloso (esp: 3,0 m).
(SCHROTH et al., 2012)	Aterro Lindenstock (Suíça, 1994)	Camada de areia siltosa (esp: 2 – 2,5 m) contendo intermitentes camadas de argila, cascalho e pedregulho.
(GALLEGO et al., 2014)	Aterro Can Planas (Espanha, 1995)	Uma camada de argila compactada (esp: 1,0 m), abaixo de uma camada de pedregulho (esp: 20 cm) e solo orgânico (esp: 20 cm)
(SCHEUTZ et al., 2014)	Aterro Klintholm (Dinamarca), Célula 0 encerrada em 1997	Uma camada de solo argiloso (esp: 3,0 – 4,0 m).
(MARIANO; JUCá, 2010)	Aterro de Aguazinha(Olinda - PE)	Uma camada de solo areno argiloso (esp. 25 a 90 cm)
(MACHADO et al., 2009)	Aterro Sanitário Metropolitano Centro (Salvador - Ba)	Drenos horizontais abaixo de uma membrana de PVC, uma camada de solo argiloso (esp: 60 cm) e uma camada de solo orgânico (esp: 20 cm).
(MAGALHãES, 2005)	Aterro Sanitário de Belo Horizonte-MG	Uma camada de solo misturada com RCD (esp: 0,50 – 2,00 m) abaixo de uma camada de solo argiloso (esp: 0,5– 2,0m)
(SAMUEL-ROSA; DALMOLIN; PEDRON, 2011)	Aterro de RSU de Santa Maria (Santa Maria - RS)	Uma camada de solo argiloso (esp: 0,2–1,0 m)
(SILVA; FREITAS; CANDIANI, 2013)	Aterro de Nova Iguaçu (Nova Iguaçu - RJ)	Uma camada de areia silto argilosa (esp: 80 cm)

É possível notar um grande aumento em pesquisas sobre o uso de coberturas alternativas. Isto se deve à necessidade de redução de custos, aos problemas recorrentes das coberturas tradicionais, relacionados ao fissuramento e a perda de eficiência a longo prazo e ao crescente

Figura 2.5: Conceito de armazenamento e esvaziamento usado para o projeto de coberturas alternativas.

Fonte: Adaptado de Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012).



desenvolvimento de tecnologias com o comportamento associado ao clima. Geralmente, o funcionamento das coberturas alternativas baseia-se em fenômenos nem sempre considerados no dimensionamento das coberturas, por exemplo, evaporação, adsorção e capilaridade.

### 2.4.1 Coberturas evapotranpirativas

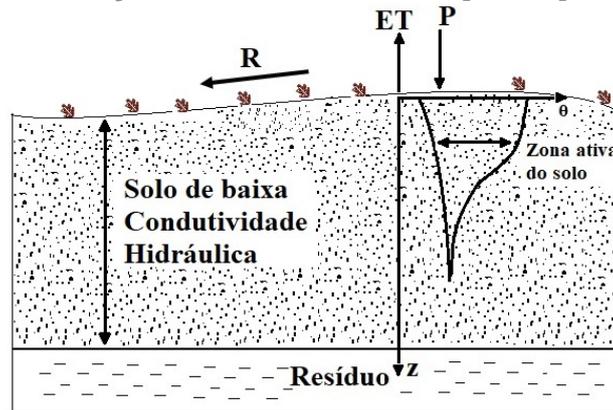
As coberturas ET consistem em uma camada espessa de solo de grão relativamente fino. É comum que acima da barreira ET seja colocada uma camada superficial de solo que promova e suporte o crescimento da vegetação, de forma a reduzir o potencial de erosão gerado pela ação da água ou do vento (TEIXEIRA, 2008). Os tipos de solo usados para a construção de barreiras ET incluem areias siltosas, siltes e siltes argilosos. Esse perfil é conhecido como cobertura monolítica ou monocamada, justamente por ser composta de uma única camada de solo. As barreiras ET exploram duas características dos solos finos (ainda que menos argilosos que os das camadas resistivas):

- A elevada capacidade de armazenamento d'água; e
- A baixa condutividade hidráulica, mesmo em altos graus de saturação.

As barreiras ET controlam o fluxo de água para o interior do aterro por criar uma espécie de reservatório, usando o sistema de poros do solo associado com a sua capacidade de retenção d'água. A água acumulada na cobertura é removida pela evapotranspiração, permitindo que a camada possa receber uma nova descarga de água, mantendo a sua eficiência e minimizando a infiltração para o resíduo. A Figura 2.6 ilustra uma barreira do tipo evapotranpirativa.

A alta capacidade do solo de armazenar água permite que esta seja posteriormente removida por evapotranspiração. A baixa condutividade hidráulica limita o avanço da frente de umedecimento na barreira durante os períodos chuvosos sazonais. Uma barreira ET deve ser suficientemente espessa para que o teor de água no solo se mantenha constante próximo a sua base, dessa forma, as principais alterações no teor de umidade devem ocorrer próximas às suas porções superiores. Em caso contrário, a sua eficiência é comprometida.

Figura 2.6: Ilustração de uma barreira do tipo Evapotranspirativa.



A espessura de barreira ET é função da frequência e intensidade das precipitações, das propriedades hidráulicas do solo em seu estado de não saturação, do tipo da cobertura vegetal, da taxa na qual a água pode ser removida por evapotranspiração, dentre outros fatores. A espessura da barreira varia tipicamente de cerca de 0,9 m a mais de 2 m.

Pesquisas anteriores têm mostrado que barreiras do tipo ET podem ser bastante efetivas em limitar a percolação e controlar a erosão em coberturas instaladas em regiões de clima seco (DWYER, 1998; DWYER, 2001; NYHAN; HAKONSON; DRENNON, 1990; NYHAN; SCHOFIELD; SALAZAR, 1997).

## 2.4.2 Barreiras Capilares

As barreiras capilares consistem em uma ou mais camadas de solo de granulação mais fina sobrejacente a uma camada de solo de granulação mais grossa. É um tipo de cobertura de aterro que foi desenvolvido para uso em regiões de climas áridos e semi-áridos. Uma barreira capilar tem sua concepção baseada nos conceitos da mecânica dos solos não saturados, e utiliza o contraste das propriedades hidráulicas existente entre solos de diferentes texturas, para otimizar a sua capacidade de armazenar água.

A Figura 2.7 ilustra uma configuração simples de uma barreira capilar, com uma única camada de solo de granulação fina, caracterizada como camada de armazenamento, sobre uma camada de granulação mais grossa, caracterizada como camada de bloqueio.

Da mesma forma que as barreiras ET as barreiras capilares demandam uma camada superficial para servir de suporte para a vegetação e assim proteger as camadas subjacentes de processos erosivos. As barreiras capilares utilizam dois recursos para dar destino à água que se armazena por infiltração. A primeira possibilidade é de que a água que infiltra na camada de solo fino fique armazenada até ser extraída por ET. E numa segunda possibilidade, caso haja inclinação, a água pode ser desviada e drenada lateralmente. Nada impede que os dois processos ocorram ao mesmo tempo. De maneira a apresentar diferentes configurações de barreiras capilares, a Figura 2.8 ilustra dois diferentes exemplos de aplicação.

Apesar da aparente simplicidade dos fenômenos envolvidos em uma barreira capilar, em termos matemáticos, a sua modelagem, bem como, sua interpretação não são tão simples.

Figura 2.7: Cobertura final do tipo barreira capilar

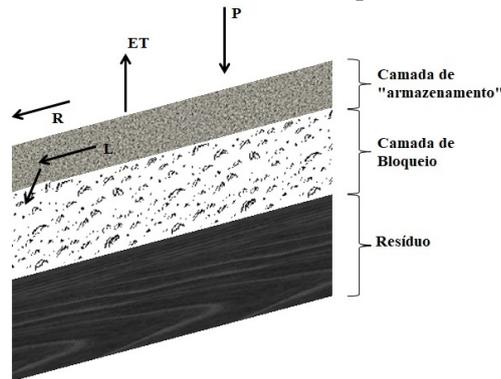
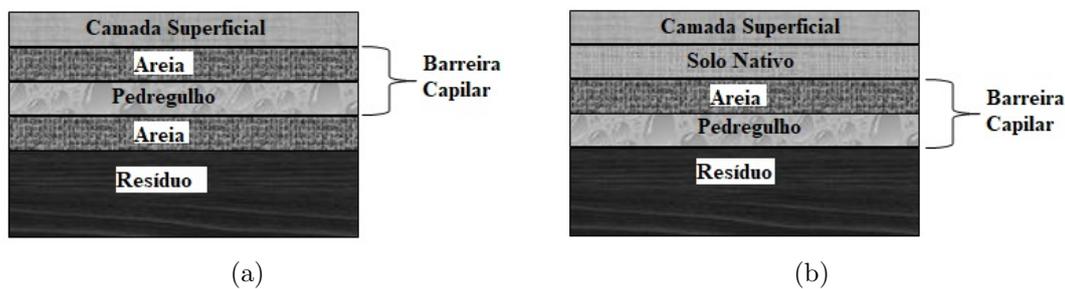


Figura 2.8: Ilustração de sistemas de cobertura que utilizam barreiras capilares.



A experiência de pesquisas anteriores (YANG et al., 2004; ABDOLAHZADEH; VACHON; CABRAL, 2011; LI et al., 2013; ZHAN et al., 2014; NG et al., 2015) têm mostrado que, em um perfil de solo composto por dois ou mais extratos, com texturas e condutividades hidráulicas diferentes, a taxa de infiltração de água é reduzida, independentemente da característica textural da camada superficial e que, em um arranjo de barreira capilar, o fluxo de água é restringido, na medida em que a frente de umedecimento aproxima-se e acumula-se sobre a interface. Tendo ciência da complexidade do assunto, a Subseção 2.4.4 buscará elucidar alguns aspectos referentes ao funcionamento das barreiras capilares.

### 2.4.3 Barreiras capilares naturais

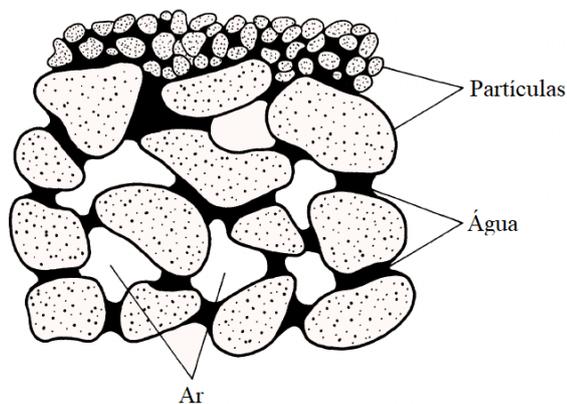
Na natureza, apenas em raras circunstâncias, contrastes suficientemente marcantes nos tamanhos dos poros ocorrem para que uma barreira capilar realmente eficaz seja formada. Geralmente, existe uma gradação entre materiais com pequenas aberturas e materiais com grandes aberturas. (MONTAZER; WILSON, 1984)

De acordo com Montazer e Wilson (1984), sob essas condições, se uma barreira capilar se desenvolve, ela serve para retardar, em vez de impedir, o fluxo de uma unidade para outra. A eficácia das barreiras capilares naturais, como no caso das barreiras capilares antrópicas, depende do contraste nos tamanhos dos poros, do estado do fluxo e da distribuição do teor de umidade das unidades adjacentes. Um exemplo comum de barreira capilar natural é onde uma camada de granulação fina se sobrepõe a uma camada de granulação grossa, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 2.9. Neste exemplo, a camada de granulação fina está

quase completamente saturada, enquanto a camada de granulação grossa tem um teor de água muito inferior ao limite de saturação.

Figura 2.9: Esboço de uma camada de granulação fina sobrepondo uma camada de granulação grossa, ilustrando uma barreira capilar natural.

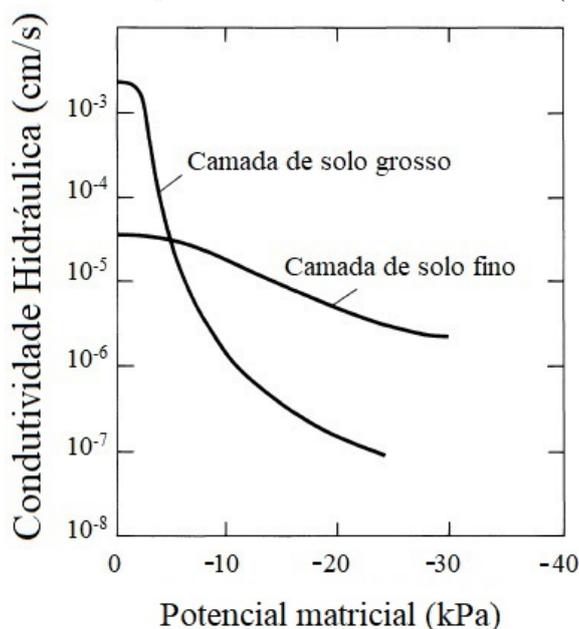
Fonte: adaptado de Montazer e Wilson (1984)



As funções de condutividade hidráulica exemplificadas por Montazer e Wilson (1984), para as duas camadas hipotéticas mostradas na Figura 2.9 são apresentadas na Figura 2.10.

Figura 2.10: Relação hipotética entre condutividade hidráulica efetiva e potencial matricial para uma camada de granulação fina sobreposta a uma camada de granulação grossa.

Fonte: adaptado de Montazer e Wilson (1984)



Para um potencial matricial menores que -5 kPa, a permeabilidade da camada de granulação grossa é menor que a da camada de granulação fina. Em um potencial matricial próximo a -10 kPa, a diferença de permeabilidade é de cerca de 1 ordem de grandeza; a -20 kPa, a diferença é de aproximadamente 2 ordens de magnitude. A taxa de fluxo descendente

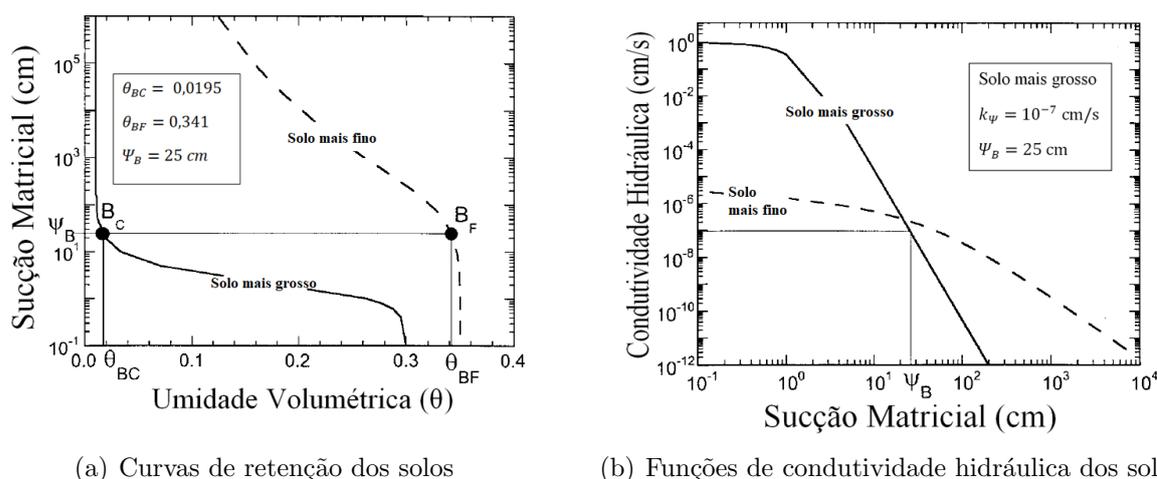
de água através das duas camadas é controlada pela camada com menor permeabilidade. Assim, para um potencial matricial inferior a -5 kPa, a taxa de fluxo é controlada pela camada superior de granulação fina. Em potenciais matriciais menores, a taxa de fluxo é controlada pela camada de granulação grossa subjacente, e a taxa de fluxo é menor do que a taxa em potenciais matriciais maiores.

## 2.4.4 Mecanismos de funcionamento de uma barreira capilar

O contraste nas propriedades hidráulicas não saturadas entre a camada de solo de textura mais fina e mais grossa em uma barreira capilar geram a impedância hidráulica que limita o movimento descendente da água, em direção à camada mais grossa de solo (KHIRE; BENSON; BOSSCHER, 2000).

Os dados observados na pesquisa de Stormont e Anderson (1999) e apresentados por Khire, Benson e Bosscher (2000) mostram que quantidades significativas de água entram no solo mais grosso somente quando a sucção matricial na superfície da camada mais grossa diminui para um valor próximo ao valor de entrada de ar do solo fino  $B_F$ . Para um bom funcionamento da barreira capilar, este valor de sucção deve conduzir também à valores de sucção próximos aos da zona de umidade residual na curva de retenção do solo grosso (ponto  $B_C$ ), ambos apresentados na Figura 2.11(a). A sucção correspondente à estes pontos é  $\psi_B$  e a umidade volumétrica de água na camada mais grossa é  $\theta_{BC}$ .  $\psi_B$  marca o momento em que os valores das condutividades hidráulicas dos dois solos são muito próximo, fato este que garante ao fluxo uma condição de continuidade hidráulica. As funções de condutividade hidráulica dos solos são apresentadas na Figura 2.11(b), que ajuda a melhor entender o funcionamento das barreiras capilares.

Figura 2.11: Caracterização hidráulica de solos que formam uma barreira capilar.  
Fonte: adaptado de Khire, Benson e Bosscher (2000)



A impedância hidráulica fornecida pela interface capilar faz com que a camada superficial mais fina atue como um amortecedor, que armazena a água infiltrada ( $S_w$ ) até  $\theta_{BF}$  ser atingido. Grande parte da água armazenada na camada do solo mais fino é mais tarde liberada de volta à atmosfera por meio da evapotranspiração (KHIRE; BENSON; BOSSCHER,

2000).

Com o intuito de ajudar na redução da água infiltrada para as camadas de resíduo, a água pode ser desviada por meio de camadas de drenagem que favoreçam ao escoamento lateral. Se a capacidade de armazenamento da camada de granulação mais fina for adequada e existir evapotranspiração ou drenagem lateral suficientes para remover a água armazenada, a percolação nos resíduos subjacentes pode ser reduzida a uma pequena quantidade. Ao depender apenas do armazenamento de água no solo para projetar uma barreira capilar de duas camadas, as espessuras das camadas e as propriedades hidráulicas não saturadas devem ser manipuladas para se obter um projeto que tenha uma capacidade adequada de armazenamento face às condições climáticas locais.

De maneira a tentar elucidar aspectos referentes à determinação da capacidade de armazenamento, bem como, a determinação das espessuras das camadas do solos de uma barreira capilar, os três próximos tópicos serão dedicados a apresentar algumas considerações sobre o tema.

## 2.4.5 Armazenamento d'água no solo

A maior parte da precipitação que entra em contato com a superfície de um sistema de cobertura infiltra-se nas camadas subjacentes e fica retida por meio de forças capilares. O destino final dessa água é principalmente o retorno para atmosfera por meio de ET. Em sistemas de cobertura dotados de uma camada superficial coberta por vegetação, é de suma importância que o solo seja capaz de reter umidade para suportar o crescimento das plantas (HILLEL, 1982).

Quanto maior a porcentagem de finos no solo, maior será a retenção de água após a drenagem por gravidade. A umidade volumétrica de um solo após a drenagem por gravidade é definida como a capacidade de campo deste solo,  $\theta_{fc}$ . Este parâmetro é frequentemente reportado como a umidade volumétrica correspondente à uma sucção matricial de  $0,03MPa$ . Para valores de umidade inferiores à capacidade de campo, a umidade do solo é mantida por capilaridade.

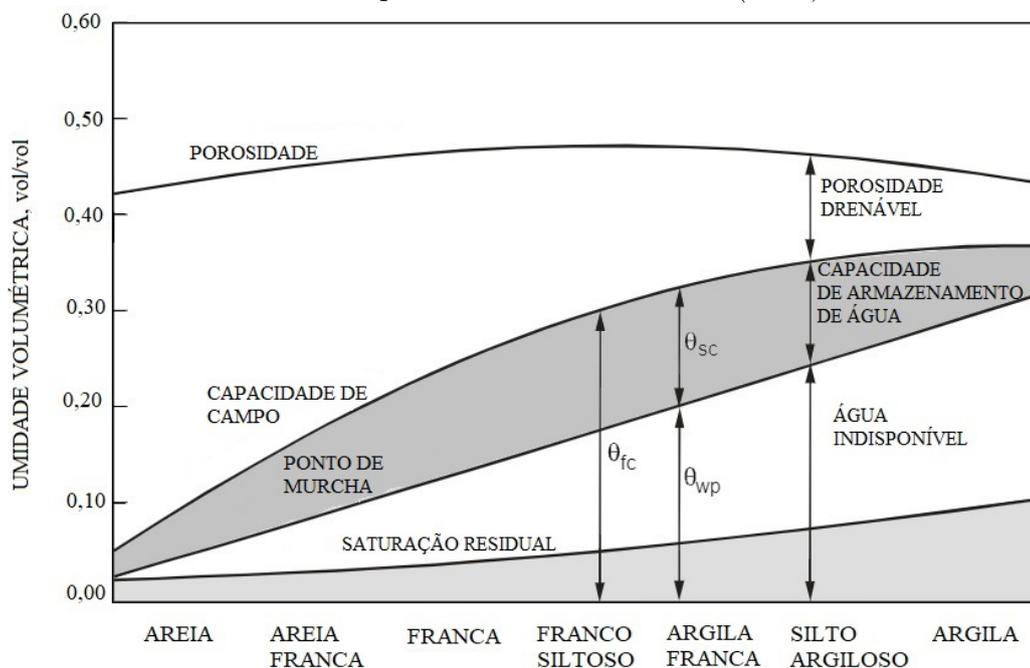
A vegetação pode reduzir o teor de umidade do solo da capacidade de campo para o ponto de murcha,  $\theta_{wp}$ . Este parâmetro é definido como a umidade volumétrica correspondente à uma sucção matricial de  $1,50MPa$ . Para valores de umidade inferiores ao ponto de murcha a planta não consegue extrair água do solo. A evaporação tende a conduzir o valor de umidade do ponto de murcha para a umidade residual do solo,  $\theta_r$ , o qual é definido como um valor de umidade correspondente à um valor de sucção matricial que tende ao infinito (HILLEL, 1998).

Embora as argilas plásticas tenham uma alta capacidade de campo, seu uso como camada de proteção não é recomendado, pois são altamente suscetíveis à ocorrência de fissuração por ressecamento, que, como consequência, criará caminhos preferenciais para infiltração d'água, diminuindo a eficiência da cobertura. Além disso, como se pode verificar na Figura 2.12, o armazenamento de água é reduzido em comparação à solos argilo-siltosos, pois que boa parte da água, fortemente aderida às partículas sólidas, pode ser considerada como indisponível para o fluxo. Tal fato é corroborado por importantes pesquisas sobre o tema, a saber:

Schroeder et al. (1994), Benson et al. (2002), Costa (2015).

Figura 2.12: Relação entre os parâmetros de retenção de umidade e a classe textural do solo.

Fonte: adaptado de Schroeder et al. (1994)



A capacidade de armazenamento de água no solo,  $\theta_{sc}$ , pode ser obtida pela diferença entre  $\theta_{fc}$  e  $\theta_{wp}$  e varia de acordo com a textura e densidade do solo. A profundidade de água ( $z_w$ ) que pode ser armazenada em uma camada de solo para posterior remoção (i.e. transpiração, evaporação ou raízes), pode ser calculada da seguinte forma:

$$z_w = \theta_{sc} z_s = (\theta_{fc} - \theta_{wp}) z_s \quad (2.1)$$

onde,  $z_s$  é a espessura da camada de solo ( $m$ ). Valores representativos de umidade, para solos de diferentes texturas, são apresentados na Tabela 2.3.

#### 2.4.6 Método para estimar a capacidade de armazenamento de água de barreiras capilares

O perfil de umidade na camada sobrejacente da barreira capilar pode ser determinado a partir do perfil de sucção utilizando-se a curva de retenção do solo (STORMONT; MORRIS, 1998).

$$\theta = \theta(\psi) \quad (2.2)$$

onde,  $\theta(\psi)$  é a umidade correspondente à sucção  $\psi$ . Dessa forma, a capacidade de armazenamento  $CR_{Fo}$  pode ser encontrada integrando a umidade ao longo da espessura da camada de solo como mostra a Equação 2.3.

Tabela 2.3: Valores representativos de teores de umidade para solos de diferentes texturas.

Fonte: adaptado de Schroeder et al. (1994)

Classificação do Solo (SUCS)	$\theta$ (vol/vol)	$\theta_{fc}$ (vol/vol)	$\theta_{wp}$ (vol/vol)	$k_s$ ( $cm \cdot s^{-1}$ )
GP	0,397	0,032	0,013	$3,0 \cdot 10^{-1}$
SP	0,417	0,045	0,018	$1,0 \cdot 10^{-2}$
SW	0,437	0,062	0,024	$5,8 \cdot 10^{-3}$
SM	0,473	0,222	0,104	$2,5 \cdot 10^{-4}$
ML	0,501	0,284	0,135	$1,9 \cdot 10^{-4}$
SC	0,398	0,244	0,136	$1,2 \cdot 10^{-4}$
CL	0,464	0,310	0,187	$6,4 \cdot 10^{-5}$
CH	0,479	0,371	0,251	$2,5 \cdot 10^{-5}$
SC	0,430	0,321	0,221	$3,3 \cdot 10^{-5}$
ML	0,419	0,307	0,180	$1,9 \cdot 10^{-5}$
ML	0,461	0,360	0,203	$9,0 \cdot 10^{-6}$
SC	0,365	0,305	0,202	$2,7 \cdot 10^{-6}$
CL	0,445	0,393	0,277	$1,9 \cdot 10^{-6}$
CH	0,452	0,411	0,311	$1,2 \cdot 10^{-6}$
CH	0,427	0,419	0,332	$6,8 \cdot 10^{-7}$
Bentonita	0,750	0,747	0,400	$3,0 \cdot 10^{-9}$

$$CR_{Fo} = \int_0^{L_f} \theta(z + \psi_w^*) dz \quad (2.3)$$

onde,

- $\theta$  é a relação entre a umidade e a sucção, ( $m^3 \cdot m^{-3}$ );
- $z$  é a distância acima da interface (solo fino/solo grosso), ( $m$ );
- $L_f$  é a espessura de camada de solo fino, ( $m$ );
- $\psi_w^*$  corresponde ao potencial de entrada de água, ou seja, correspondente ao início do fluxo d'água na camada de solo mais grosso.

Stormont e Morris (1998) adverte que o termo ( $\psi_w^*$ ) não deve ser confundido com o tradicional valor de entrada de ar das curvas de retenção dos solos (uma discussão mais ampla sobre as equações de ajuste da curva de retenção será apresentada na Subseção 2.5.1). Em seu trabalho, o autor indica ainda, a possibilidade de aplicação de qualquer equação de ajuste de curva de retenção na Equação 2.3, para resolvê-la. Modelos de ajuste mais simples,

como o de Brooks e Corey (1964), fornecem uma solução analítica para a Equação 2.3. Para outras funções, faz-se necessário um método numérico para alcançar a sua solução. Isto ocorre por exemplo quando da aplicação da função de Van Genuchten (1980) à equação proposta por Stormont e Morris (1998) para estimar a capacidade de armazenamento de água por uma barreira capilar, a saber:

$$CR_{Fo} = \theta_r L_f + (\theta_s - \theta_r) \int_0^{L_f} (\{1 + [\alpha(z + \psi_w^*)]^n\}^{-m}) dz \quad (2.4)$$

### Método para determinação da espessura das camadas de barreiras capilares

O dimensionamento tem início a partir da determinação do período crítico, que é obtido ao se fazer uma avaliação dos dados meteorológicos do local onde se pretende aplicar a barreira capilar. A determinação do período crítico ocorre quando a precipitação ( $P$ ) supera ou iguala a evapotranspiração potencial ( $ET_P$ ), ou seja,  $ET_P - P$  é igual a um valor negativo ou próximo a zero. Durante esse período a água acumula e a percolação nas camadas subjacentes da barreira capilar pode ocorrer (KHIRE; BENSON; BOSSCHER, 2000).

A capacidade de retenção requerida ( $CR_R$ ) durante esse período pode ser estimada com base em todas as formas de infiltração de água possíveis e assumindo que a evapotranspiração e o escoamento superficial são nulos, ou seja,  $CR_R = P$ . Na maioria dos casos, o período crítico pode ser estimado a partir do ano mais chuvoso registrado.

A espessura da camada é determinada de modo que sua capacidade de retenção ( $CR$ ) seja maior que a ( $CR_R$ ). A capacidade de retenção de água em uma camada de solo pode ser obtida utilizando a Equação 2.5 proposta por Stormont e Morris (1998) e ligeiramente modificada por Khire, Benson e Bosscher (2000).

$$CR_{Fo} = \int_0^{L_f} \theta(z + \psi_B) dz \quad (2.5)$$

A Equação 2.5 é igual a Equação 2.3, exceto por  $\psi_B$ , mas, de acordo com Khire, Benson e Bosscher (2000),  $\psi_B$  é análogo ao parâmetro  $\psi_w^*$ .

A capacidade de armazenamento efetivo da camada mais fina  $CR_{Fc}$  é a parte de  $CR_{Fo}$  que pode ser utilizada para armazenar a água infiltrada (ver Equação 2.1). Em regiões áridas ou semi-áridas, ao chegar o período de crescimento da vegetação da camada superficial, ocorrerá extração de água por parte das plantas (KHIRE; BENSON; BOSSCHER, 1997; WARD; GEE, 1997). A umidade volumétrica para esta condição é  $\theta_{wp}$ . Deste modo,  $CR_{Fc}$  pode ser obtida incluindo a limitação da evapotranspiração na Equação 2.5.

$$CR_{Fc} = \int_0^{L_f} \theta(z + \psi_B) dz - \theta_{wp} L_f \quad (2.6)$$

A espessura requerida da camada de solo fino  $L_R$  é o valor de  $L_f$  na Equação 2.6 que conduz à  $CR_R = CR_{Fc}$ . Segundo Khire, Benson e Bosscher (2000) valores de  $\theta \leq \theta_{wp}$  podem

ser utilizados em regiões semi-áridas para estimar o valor de  $L_R$ , pois, a literatura apresenta relatos de plantas de regiões áridas e semi-áridas que extraem água do solo a valores de sucção superiores a  $1,5MPa$ . Um exemplo são as considerações feitas por Gee, Ward e Meyer (1999), que relatam valores de  $\theta_{wp}$  correspondentes a valores de sucção superiores a  $6,0MPa$  em plantas de regiões mais áridas.

## 2.5 Conceitos associados ao fluxo em meios não saturados

As propriedades não saturadas do solo desempenham um papel relevante na forma como a água infiltra no solo. A caracterização hidráulica dos solos consiste na obtenção da sua curva de retenção e determinação da sua condutividade hidráulica. Essas propriedades são necessárias para uma adequada análise do fluxo d'água no solo, contemplando as suas variações de sucção ao longo da camada de cobertura. Esta seção aborda aspectos relevantes à determinação dessas variáveis.

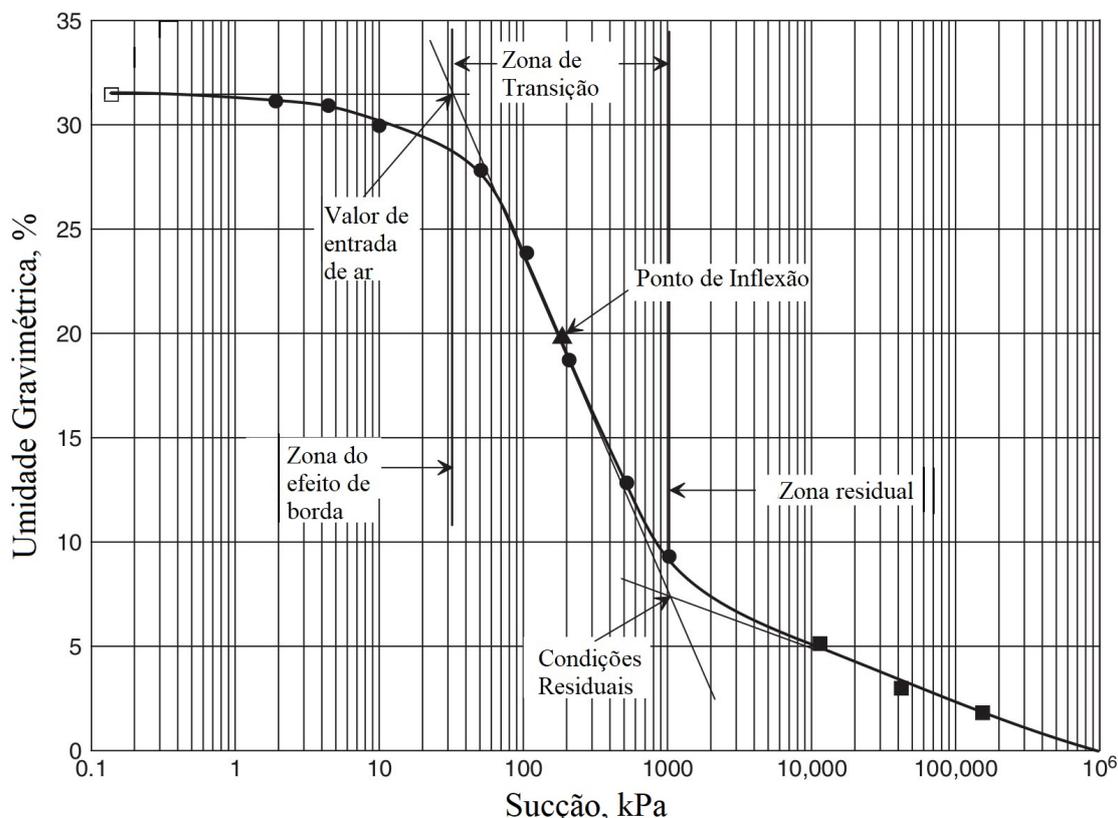
### 2.5.1 Curvas de retenção do solo

A forma como o solo administra a presença da água no seu interior pode ser representada pela curva de retenção de água. A curva de retenção consiste na relação entre a quantidade de água presente no material poroso e a energia necessária para remover essa água. Pode-se afirmar que a maioria dos processos em solos não saturados pode ser, pelo menos em parte, compreendidos em função da curva de retenção. Fredlund (2006) refere-se à curva de retenção como a propriedade chave para a implementação da mecânica dos solos não saturados na prática da engenharia sendo esta, de fato, a propriedade mais importante do solo não saturado. A Figura 2.13 mostra um exemplo de uma curva de retenção e suas zonas de dessaturação.

Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012) dividem a dessaturação do solo em três zonas principais, a saber:

- Zona saturada ou zona do efeito de borda: Esta zona é limitada à direita pelo valor de entrada de ar ( $\psi_b$ ) e se caracteriza pelo fato de apresentar valores de grau de saturação ( $S_r$ ) que variam entre 100 e 90%;
- Zona de transição: Esta é uma zona que está situada entre  $\psi_b$  e a sucção residual ( $\psi_r$ ). Caracteriza-se pela ocorrência da zona onde ocorre a maior parte da drenagem d'água dos poros. Apresenta valores de  $S_r$  que variam entre 90 e 15%;
- Zona residual: Tem seu início a partir de  $\psi_r$  e a partir desse ponto acréscimos elevados de sucção causam pequenas variações nos valores de  $S_r$ . Apresenta valores de  $S_r$  que variam entre 15 e 0%.

Figura 2.13: Zonas de dessaturação definidas na curva de retenção do solo.  
 Fonte: adaptado de Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012)



### Equações de ajuste da curva de retenção

Muitas equações têm sido propostas para estimativa da curva de retenção do solo sendo que, as mais utilizadas são as propostas por Brooks e Corey (1964), Van Genuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994). Alguns dos parâmetros de ajuste destas equações apresentam significado físico enquanto que outros são utilizados como simples parâmetros de ajuste da equação aos resultados experimentais.

### Equação de Brooks e Corey (1964) e Van Genuchten (1980)

A equação proposta por Brooks e Corey (1964) é conhecida pela sua simplicidade no ajuste da curva de retenção (FUTAI, 2002). A Equação 2.7, para estimar a curva de retenção é definida como:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left( \frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda \quad (2.7)$$

Onde,

- $\theta_s$  é a umidade volumétrica na saturação, ( $m^3 \cdot m^{-3}$ );

- $\theta_r$  é a umidade volumétrica residual, ( $m^3 \cdot m^{-3}$ );
- $\psi_b$  é o valor de entrada de ar, ( $kPa$ );
- $\psi$  é a sucção, ( $kPa$ ); e
- $\lambda$  é o índice de distribuição do tamanho dos poros, definida como a inclinação da curva de retenção do solo.

A expressão proposta por Van Genuchten (1980), Equação 2.8, para estimar a curva de retenção é definida como:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad (2.8)$$

Onde,

- $m = 1 - \frac{1}{n}$ , com  $0 < m < 1$ ;
- $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$  são parâmetros empíricos de ajuste da curva de retenção.

No que diz respeito à influência dos parâmetros,  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$  na Equação 2.8, pode-se dizer que o parâmetro  $\alpha$  está diretamente relacionado ao valor da pressão de entrada de ar. O parâmetro  $n$  controla a inclinação da curva e relaciona-se com a distribuição granulométrica, de tal modo que, quanto mais uniforme for o solo maior será o valor de  $n$ . O parâmetro  $m$  determina o ponto de inflexão da parte inferior da curva de retenção e o patamar mínimo da mesma. (GENUCHTEN, 1980).

As equações propostas por Brooks e Corey (1964) e Genuchten (1980) são consideradas modelos mais antigos e dentro de suas considerações, está a limitação do ajuste da curva de retenção somente até o valor de umidade residual do solo (JUNIOR; MARINHO; SOTO, 2015), não permitindo, na maioria dos casos, a reprodução da drenagem do solo até a sua completa secagem.

### Equação de Fredlund e Xing (1994)

A proposta de Fredlund e Xing (1994) apresentada na Equação 2.9 está baseada na existência de uma similaridade entre a geometria dos poros e a curva granulométrica (FERREIRA; GERSCOVICH; SOEIRO, 2011). Trata-se de uma proposta amplamente utilizada e que se aplica muito bem à ajustes em solos que apresentem uma distribuição de poros unimodal (FUTAI, 2002).

$$\theta = \theta_s \cdot \left[ 1 - \frac{\ln \left( 1 + \left( \frac{\psi}{\psi_r} \right) \right)}{\ln \left( 1 + \left( \frac{10^6}{\psi_r} \right) \right)} \right] \cdot \left[ \frac{1}{\ln \left( e + \left( \frac{\psi}{\alpha} \right)^n \right)} \right]^m \quad (2.9)$$

Onde,

- $\theta_s$  é a umidade volumétrica na saturação, ( $m^3 \cdot m^{-3}$ );
- $\psi_r$  é a sucção correspondente à umidade volumétrica residual  $\theta_r$ , ( $kPa$ );
- $\psi$  é a sucção, ( $kPa$ );

## 2.5.2 Métodos para a determinação da curva de retenção

Os parâmetros obtidos a partir da curva de retenção são importantes para elucidar fenômenos relacionados à infiltração e retenção d'água no solo. Portanto, é importante que a sua determinação seja realizada de maneira adequada, com os métodos apropriados para cada faixa de sucção, de forma a atender à especificidade de cada solo. Infelizmente, não existe um método que consiga abranger todo o intervalo de sucção desejado (0 à  $10^6 kPa$ ) na maioria dos casos, a não ser para o caso específico de solos arenosos sem a presença de silte e argila. O usual é a adoção de dois ou mais métodos, sendo seus fundamentos e aplicações apresentados nesta seção.

### Método da placa de sucção

O ensaio de Placa de sucção, também é conhecido como funil de Haines e consiste na medição de sucção utilizando um equipamento composto com uma base porosa de alta entrada de ar, uma câmara de proteção, bases com alturas ajustáveis, um tubo flexível e um sistema extravasor de água com regulador, ver Figura 2.14. Essa metodologia é aplicável para valores de sucção ente 0 e  $70 kPa$ , porém, devido a algumas dificuldades em manter a continuidade da coluna de água, na prática este é recomendável para valores de até  $40 kPa$ . Como vantagem, este método apresenta a possibilidade de definição do início da curva de retenção com grande precisão. Como os valores de sucção são determinados diretamente do desnível entre a saída de água e o topo da pedra porosa, este método pode ser empregado como um método de referência.

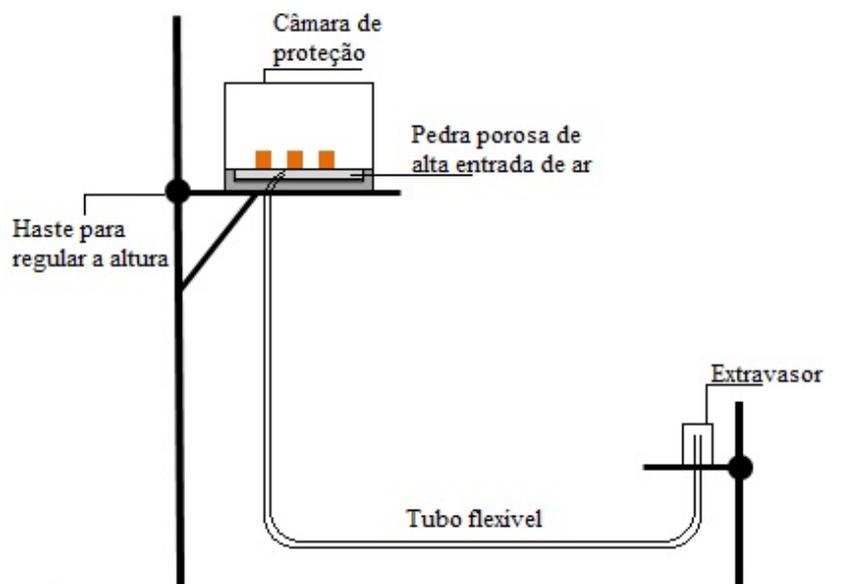
### Método da placa de pressão

As limitações experimentais encontradas em certos equipamentos, como a placa de sucção e tensiômetros, estão, principalmente, relacionadas à dificuldade de se controlar e/ou medir pressões negativas devido ao fenômeno denominado de cavitação (MARINHO; SOTO; JUNIOR, 2015).

A placa de pressão é um equipamento que é capaz de contornar essas dificuldades, aplicando uma mudança do referencial de pressão de ar, de modo a levar a pressão da água a valores acima da pressão atmosférica. Essa mudança de referencial é denominada de translação de eixo, tendo sido introduzida no meio geotécnico por Hilf (1956).

O equipamento consiste em uma câmara que deve ser hermeticamente fechada e que contém, no seu interior, uma placa porosa de elevada pressão de entrada de ar, conforme ilustra a Figura 2.15. Esse sistema permite o controle da sucção pelo método de translação

Figura 2.14: Ilustração do método da placa de sucção.  
Fonte: adaptado de Marinho, Soto e Junior (2015)

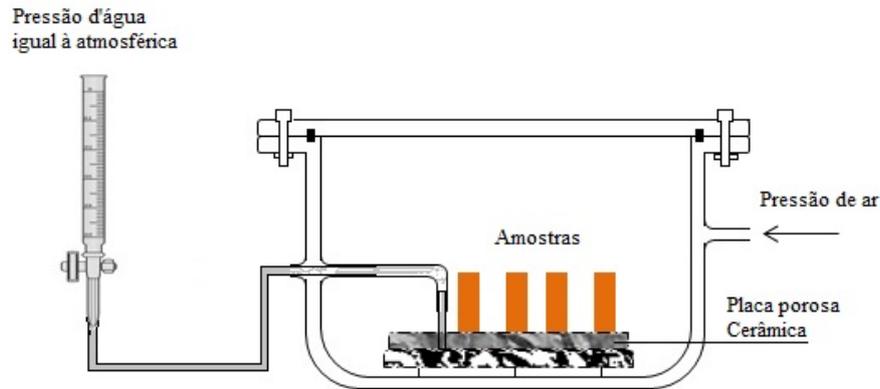


de eixos. Assim como no caso da placa de sucção, o sistema da placa de pressão pode ser empregado de duas formas principais:

- Com o uso de um único corpo de prova.
- Com o uso de múltiplos corpos de prova e acompanhamento de seus teores de umidade com base em pesagem periódica dos corpos de prova.

O primeiro procedimento é adotado em materiais com baixa coesão e que não podem ser manipulados a cada estágio de sucção. O teor de umidade é medido com a retirada de um corpo de prova por sucção aplicada. A segunda alternativa é usada para materiais coesivos, nos quais a manipulação dos corpos de prova pode ser feita sem que haja perda de material. Nesse caso, tanto o peso quanto o volume do corpo de prova devem ser determinados de modo a permitir a determinação de parâmetros relacionados com o volume (i.e. grau de saturação, teor de umidade volumétrico e índice de vazios) (MARINHO; SOTO; JUNIOR, 2015).

Figura 2.15: Ilustração do método da placa de pressão.  
 Fonte: adaptado de Marinho, Soto e Junior (2015)



### Método do ponto de orvalho

Esse método consiste no emprego de potenciômetros de ponto de orvalho para a determinação da sucção total do solo. O método se diferencia do emprego de psicrômetros à medida que potenciômetros de ponto de orvalho não sofrem das severas limitações decorrentes da exigência de controle de temperatura durante o emprego de psicrômetros. A aplicação prática desse método assemelha-se, do ponto de vista de execução, ao método do papel-filtro (sem contato, medida da sucção total), diferenciando-se, apenas, na forma de determinação da sucção (MARINHO; SOTO; JUNIOR, 2015).

Um equipamento que é amplamente utilizado para determinar a curva de retenção é o WP4C, que permite medidas rápidas do potencial de água. O equipamento usa um espelho como meio de detecção do ponto de orvalho das amostras. A temperatura do espelho é precisamente controlada por um refrigerador termoeletrônico (DEVICES, 2007). Maiores detalhes sobre os mecanismos do equipamento serão apresentados na Subseção 3.3.5.

A pressão de vapor acima da amostra do solo na câmara e a pressão do vapor saturado na mesma temperatura são calculadas usando as temperaturas do ponto de orvalho e da amostra, respectivamente. A equação de Kelvin (Equação 2.10) é então usada para calcular a sucção total da amostra de solo. Os cálculos são realizados internamente, no dispositivo, e a sucção total é exibida junto com a temperatura da amostra.

$$\psi = \frac{-RT_K \rho_w}{\omega_v} \ln \left( \frac{u_v}{u_{v0}} \right) \quad (2.10)$$

onde,

- $R$  é a constante universal dos gases,  $8,31432 \text{ (} J \cdot \text{mol}^{-1} \cdot K^{-1} \text{)}$ ;
- $T_K$  é a temperatura absoluta do gás,  $(K)$ ;
- $\rho_w$  é a densidade da água,  $(kg \cdot m^{-3})$ ;
- $\omega_v$  é a massa molecular do vapor de água,  $(18,016 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1})$ ;

- $u_v$  é a pressão parcial do vapor de água no ar, ( $kPa$ );
- $u_{v0}$  é pressão de saturação do vapor de água sobre uma superfície plana de água pura à mesma temperatura, ( $kPa$ ).

A relação entre  $u_v/u_{v0}$  é a umidade relativa ( $RH$ ). Para uma temperatura específica, as variáveis que multiplicam o logaritmo neperiano da umidade relativa  $\ln(RH)$  se tornam uma constante (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012). Para uma temperatura de 20 °C a constante de energia livre é 135,053, e é possível assim escrever a sucção total como uma função da umidade relativa:

$$\psi = -135,053 \ln \left( \frac{u_v}{u_{v0}} \right) \quad (2.11)$$

O ponto de orvalho é a temperatura na qual o ar deve ser resfriado para que o vapor de água no ar se condense na água líquida. No ponto de orvalho, o vapor de água presente no ar é suficiente para saturá-lo. A umidade relativa é a razão entre a pressão de vapor saturado da água no ponto de orvalho e a pressão de vapor saturado da água na temperatura do ar. A técnica que utiliza o resfriamento do espelho é considerada o método mais preciso para a medição do ponto de orvalho (LEONG; TRIPATHY; RAHARDJO, 2003).

## Método da tensiometria

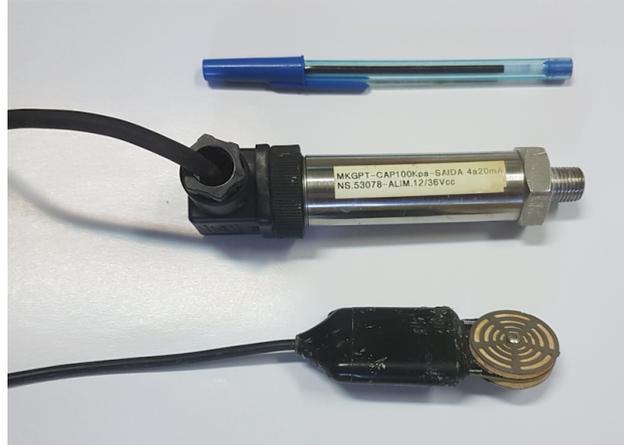
O tensiômetro permite a medição direta da pressão negativa da água do solo, a partir da qual tem-se o valor da sucção matricial. A componente osmótica da sucção não é medida pelos tensiômetros, já que ocorre passagem dos sais solúveis através do sistema de medição. A ponteira porosa do tensiômetro é responsável por promover a interface entre a água do dispositivo e o solo sem permitir a entrada de bolhas de ar no sistema (SOUSA, 2012).

Para desempenhar tal função, emprega-se, geralmente, um material cerâmico com alto valor de entrada de ar. O tensiômetro possui um compartimento interno que deve ser completamente preenchido por água e acoplado a um dispositivo para medição da pressão da água. O dispositivo de medição da pressão gerada no interior do compartimento pode ser de três tipos: manômetro de mercúrio, manômetro de vácuo e transdutor elétrico de pressão (ver Figura 2.16). A vantagem do manômetro de mercúrio é que não existe necessidade de calibração, porém, a correção da densidade deve ser feita evitando-se erros de até 0,25% na leitura (OLIVEIRA, 2004). O transdutor de alta capacidade apresentado na Figura 2.16 tem os seus detalhes discutidos nos materiais e métodos.

Os manômetros de vácuo podem medir tensões de 0 a 100 kPa, sendo de fácil manutenção, porém, apresentando baixa acurácia. Os transdutores elétricos de pressão, diferentemente dos dois tipos de dispositivos citados anteriormente, permitem uma aquisição de dados automática. O princípio do seu funcionamento está no deslocamento de uma membrana e de resistores colados a ela, induzindo, assim, uma variação de resistência do sistema e, conseqüentemente, uma variação de tensão. Transdutores podem ter elevada acurácia e precisão quando bem calibrados, além de requererem pouco fluxo de água para entrarem em equilíbrio com o solo, possibilitando um menor tempo de equilíbrio (SOUSA, 2012).

Tensiômetros de diferentes dimensões e geometrias podem ser encontrados no meio acadêmico e no mercado, sendo possível sua aplicação tanto no campo quanto na instrumentação de ensaios de laboratório. Apesar de poder ser empregado no laboratório, o tensiômetro é mais conhecido pela sua aplicação no monitoramento *in situ* (MARINHO, 2009).

Figura 2.16: Tensiômetro de alta e de baixa capacidade.



### 2.5.3 Condutividade hidráulica do solo

A lei de Darcy (1856), apresentada nas Equação 2.12 e Equação 2.13, respectivamente, em termo da vazão e da velocidade de descarga, estabelece que a vazão ( $q$ ) é diretamente proporcional à área da seção transversal ( $A$ ) por onde a água passa, bem como, à diferença entre as cargas totais nas extremidades ( $\Delta H$ ) e inversamente proporcional ao caminho que a água precisa percorrer, o comprimento da amostra de solo ( $L$ ). Em outras palavras,  $q$  é proporcional ao gradiente hidráulico da água intersticial. O coeficiente que relaciona essas variáveis é o coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica ( $k$ ) (BICALHO; MACHADO; GERSCOVICH, 2015).

$$q = k_s \cdot \frac{\Delta H}{L} \cdot A \quad (2.12)$$

ou

$$v = k_s \cdot \frac{\Delta H}{L} \quad (2.13)$$

onde,  $k_s$  é a condutividade hidráulica saturada; e a relação ( $i = \Delta H/L$ ) é o gradiente hidráulico médio de um trecho  $n$ .

O fluxo de água ocorre nos poros do solo que já foram preenchidos por água, dessa maneira, a porcentagem de vazios em meio saturado é um fator fundamental para determinação da condutividade hidráulica do solo. Quando o solo começa o processo de dessaturação, o ar ocupa primeiro os poros maiores e isso força o fluxo de água ocorrer nos poros menores. Dessa forma, há um acréscimo significativo na tortuosidade, o que conduz a um fluxo muito mais lento. O coeficiente de condutividade hidráulica em relação a água ( $k_w$ ) é a medida da facilidade com a qual a água pode fluir pelos poros de um solo não saturado. Trata-se de

uma variável que depende das propriedades do meio poroso e do fluido percolante. Diferentes tipos de fluidos i.e., água ou óleo e diferentes tipos de solos i.e., areia ou argila produzem diferentes valores de  $k_w$  (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012). A condutividade hidráulica  $k_w$  em relação a água pode ser expressada em termos da permeabilidade intrínseca do solo  $K$  como apresenta a Equação 2.14.

$$k_w = \frac{\rho_w g}{\mu_w} K \quad (2.14)$$

onde,

- $g$  é aceleração da gravidade, ( $m \cdot s^{-2}$ );
- $\mu_w$  é a viscosidade absoluta da água, ( $cP$ );
- $\rho_w$  é a massa específica da água, ( $kg \cdot m^{-3}$ ).

A permeabilidade intrínseca do solo, representa uma característica do meio poroso pressupostamente independente das propriedades do fluido. O meio poroso, por sua vez, é uma função das relações de massa e volume do solo. De acordo com Lloret e Alonso (1980),  $k_w$  é função de 2 ou 3 possíveis relações de massa e volume do solo, a saber:

$$k_w = f(w, e) \quad (2.15)$$

ou

$$k_w = f(S_r, e) \quad (2.16)$$

ou

$$k_w = f(S_r, w) \quad (2.17)$$

Onde,  $S_r$  é o grau de saturação do solo;  $e$  é o índice de vazios do solo; e  $w$  é a umidade gravimétrica do solo.

A condutividade hidráulica do solo é geralmente assumida como constante na maioria das análises de fluxo transiente e estacionário em problemas relacionados à solos saturados. Para o caso dos solos não saturados, essa consideração já não é válida, pois, variações tanto no índice de vazios quanto no grau de saturação dos solos afetam de maneira significativa os valores do coeficiente de condutividade hidráulica (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012).

## 2.5.4 Funções de condutividade hidráulica

A literatura lista quatro diferentes técnicas para estimar as funções de condutividade hidráulica dos solos, a saber: modelos empíricos; estatísticos; de correlação; e de regressão. Os modelos mais aplicados são os empíricos e os estatísticos e estes serão discutidos a seguir.

Os modelos empíricos, assumem a existência de uma relação entre a curva de retenção e a função de condutividade hidráulica dos solos. Brooks e Corey (1964) sugeriram que a função

de permeabilidade poderia ser obtida usando o coeficiente de permeabilidade saturado e a relação entre a sucção matricial versus grau de saturação. A partir da curva de retenção dos solos é possível se obter três parâmetros do solo, a saber:  $\psi_b$ , o grau de saturação residual  $S_r$  e  $\lambda$ .

Corey (1954) sugeriu que esses parâmetros fossem visualizados num gráfico (Grau de saturação efetivo ( $S_e$ ) versus Sucção), como apresentado na Figura 2.17. O grau de saturação efetivo é obtido a partir da Equação 2.18, onde:

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad (2.18)$$

Dessa maneira, a equação proposta por Brooks e Corey (1964) é apresentada a seguir para a condição  $u_a - u_w \leq (u_a - u_w)_b$  na Equação 2.19 e para a condição  $u_a - u_w \geq (u_a - u_w)_b$  na Equação 2.20.

$$k_w = k_s \quad (2.19)$$

$$k_w = k_s S_e^\delta \quad (2.20)$$

onde,

- $\delta$  é uma constante empírica para a função de permeabilidade.

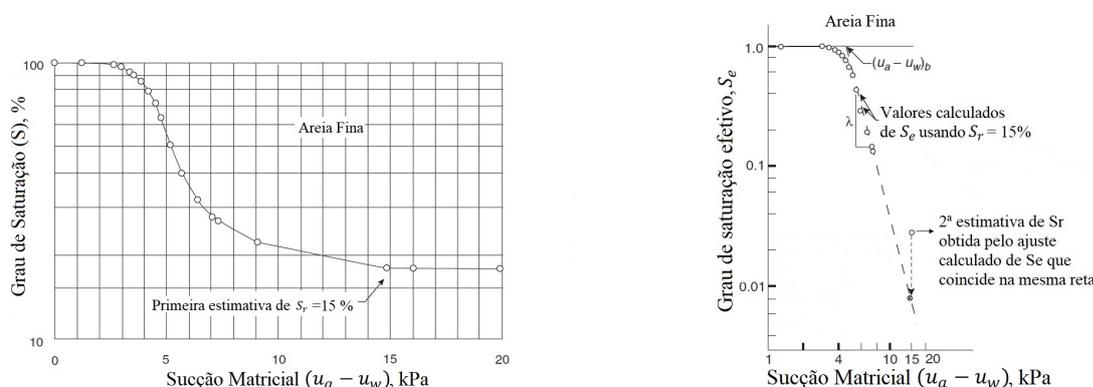
A constante empírica  $\delta$  é definida em função do índice de distribuição do tamanho dos poros  $\lambda$  na Equação 2.21.

$$\delta = \frac{2 + 3\lambda}{\lambda} \quad (2.21)$$

O grau de saturação efetivo pode ser calculado, num primeiro momento, a partir da estimativa de  $S_r$ , como apresenta a Figura 2.17(a). Posteriormente vários *loops* são realizados na obtenção de novos pontos que são obtidos a partir de novas estimativas de  $S_r$  que conduzam a valores de  $S_e$  que sejam forçadamente mantidos sob uma mesma reta (Figura 2.17(b)).

Figura 2.17: Curvas propostas por Brooks & Corey 1964 para determinação da função de permeabilidade.

Fonte: adaptado de Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012)



(a) Curva Sucção *versus* grau de saturação.

(b) Curva Sucção *versus* grau de saturação efetivo.

Os modelos estatísticos tem como base um modelo físico da montagem dos canais de poros pelos quais a água pode fluir. O modelo físico mais conhecido é o de Childs e Collis-George (1950) e diversas funções de permeabilidade baseiam-se nesse modelo. A grande maioria dessas funções utiliza um procedimento de integração ao longo da curva de retenção dos solos, tendo como ponto de partida as condições saturadas do solo (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012).

Existem muitas propostas de estimativa da função de condutividade hidráulica com base em hipóteses sobre a distribuição de poros (CHILDS; COLLIS-GEORGE, 1950; BURDINE, 1953; MARSHALL, 1958; KUNZE; UEHARA; GRAHAM, 1968; MUALEM, 1976; D.G.FREDLUND; XING; HUANG, 1994).

D.G.Fredlund, Xing e Huang (1994) usaram a equação de ajuste da curva de retenção de Fredlund e Xing (1994) associada ao modelo físico de Childs e Collis-George (1950) para calcular a função de permeabilidade do solo. O procedimento envolve a integração ao longo da curva de retenção e a função de permeabilidade pode ser calculada tanto em trajetória de secagem quanto em trajetória de molhagem. A variação de volume da amostra de solo é desprezada e a condutividade hidráulica é calculada utilizando a Equação 2.22:

$$k(\theta) = k_s \frac{\int_{\theta_L}^{\theta} \frac{\theta-x}{\psi^2(x)} dx}{\int_{\theta_L}^{\theta_s} \frac{\theta_s-x}{\psi^2(x)} dx} \quad (2.22)$$

onde,

- $\psi$  é a sucção do solo como uma função da umidade volumétrica ( $\theta$ ), (kPa);
- $x$  é uma variável auxiliar de integração representando o teor de água;
- $\theta_s$  é a umidade volumétrica na saturação, ( $m^3 \cdot m^{-3}$ ); e
- $\theta_L$  é o limite inferior de  $\theta$ , ( $m^3 \cdot m^{-3}$ ).

O coeficiente de permeabilidade relativa  $k_r(\psi)$  é igual ao coeficiente de permeabilidade numa determinada sucção  $k_w(\psi)$  em relação ao coeficiente de permeabilidade saturada ( $k_s$ ).

$$k_r(\psi) = \frac{k_w(\psi)}{k_s} \quad (2.23)$$

Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012) sugerem que a Equação 2.22 seja expressada como um coeficiente relativo de permeabilidade  $k_r(\theta_i)$ , na forma da integral representada pela Equação 2.24:

$$k_r(\theta) = \frac{\int_{\theta_L}^{\theta} \frac{\theta-x}{\psi^2(x)} dx}{\int_{\theta_L}^{\theta_s} \frac{\theta_s-x}{\psi^2(x)} dx} \quad (2.24)$$

Conforme relatado anteriormente, a umidade volumétrica residual ( $\theta_r$ ) é caracterizada por ser um ponto da curva de retenção onde faz-se necessário um grande acréscimo no valor da sucção para que ocorra uma extração muito pequena de água dos poros do solo. De acordo com Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012), é comum que se adote que a permeabilidade do solo seja igual a zero quando a umidade alcança um valor próximo à  $\theta_r$ . Kunze, Uehara e Graham (1968) investigaram as consequência de se usar apenas uma parte da curva de retenção para a previsão da função de condutividade hidráulica e concluíram que o aumento na acurácia da estimativa estava associada à consideração de valores de  $\theta_L$  inferiores às condições residuais. Dessa forma, a integração de  $x$  deve ser conduzida no intervalo compreendido entre  $\theta_s$  à  $\theta_r$ . A Equação 2.24 pode ser aplicada então da seguinte forma:

$$k_r(\theta) = \frac{\int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{\theta-x}{\psi^2(x)} dx}{\int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{\theta_s-x}{\psi^2(x)} dx} \quad (2.25)$$

Utilizando a Equação 2.9 e a Equação 2.25 a Equação 2.25 pode ser transformada para a seguinte forma

$$k_r(\psi) = \frac{\int_{\psi}^{\psi_r} \frac{\theta(y)-\theta(\psi)}{y^2} \theta'(y) dy}{\int_{\psi_b}^{\psi_r} \frac{\theta(y)-\theta_s}{y^2} \theta'(y) dy} \quad (2.26)$$

onde,

- $\psi_r$  é a sucção correspondente à umidade residual  $\theta_r$ , ( $kPa$ );
- $y$  é uma variável auxiliar de integração representando a sucção;
- $\theta'$  é a derivada da equação de ajuste de Fredlund e Xing (1994)

Para evitar dificuldades numéricas associadas à execução da integração na faixa de sucção de  $\psi_b$  até  $10^6$  em uma escala aritmética, é mais conveniente executar a integração na escala logarítmica. Dessa forma é preferível apresentar a Equação 2.26 da seguinte forma:

$$k_r(\psi) = \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\psi_b}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (2.27)$$

onde,

- $b$  é o limite superior de integração, i.e.,  $\ln(10^6)$ ;
- $y$  é uma variável fictícia de integração representando o logaritmo da sucção;
- $e^y$  é o número natural elevado à potência da variável fictícia de integração.

Mualem (1976) analisou um modelo conceitual de um meio poroso semelhante ao modelo de Childs e Collis-George (1950) e derivou a seguinte equação para prever o coeficiente de permeabilidade:

$$k_r(\theta) = S_e^q \cdot \left( \frac{\int_{\theta_r}^{\theta} \frac{d\theta}{[\psi(\theta)]}}{\int_{\theta_r}^{\theta_s} \frac{d\theta}{[\psi(\theta)]}} \right)^2 \quad (2.28)$$

onde,

- $q$  é uma constante definida como 0,5 para a maioria dos solos;
- $k_r(\theta)$  é o coeficiente de permeabilidade relativo [ou seja,  $k_r(\theta) = k(\theta)/k_s$ , onde  $k(\theta)$  é qualquer coeficiente de permeabilidade em função da umidade volumétrica e  $k_s$  é o coeficiente saturado de permeabilidade do solo].

O valor de  $q$  depende das propriedades solo-fluido e pode variar consideravelmente para diferentes solos. Com base nos dados de permeabilidade para 45 solos, Mualem (1976) sugeriu um valor ótimo de 0,5 para a variável  $q$ . As integrações são realizadas ao longo do eixo da umidade volumétrica e a permeabilidade é expressa em função da umidade volumétrica. A equação de van Genuchten (1980) para a curva de retenção do solo pode ser usada em combinação com a forma de equação de integração de Mualem (1976) para a função de permeabilidade. (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012)

Van Genuchten sugeriu que os parâmetros de ajuste da curva de retenção do solo poderiam ser utilizados para estimativa da curva de condutividade hidráulica. Substituindo a equação de van Genuchten (1980) no modelo de integração estatística proposto por Mualem (1976), uma expressão de forma fechada foi derivada para a função de condutividade hidráulica:

$$k_r(\psi) = \frac{[1 - (\alpha\psi)^{n-1} [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}]^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{0,5}} \quad (2.29)$$

A Equação 2.29 é comumente chamada de equação de função de condutividade hidráulica van Genuchten-Mualem (van Genuchten (1980)). Combinando o modelo de van Genuchten

(1980) com  $m = n - 1/n$ , com o modelo de Mualem (1976), obtém-se a função da condutividade hidráulica tal como:

$$k(\psi) = k_s S_e^{0,5} \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (2.30)$$

Devido à sua ampla utilização e simplicidade, esta foi a função de condutividade hidráulica utilizada nesse trabalho.

### 2.5.5 Equação para fluxo unidirecional em solos não saturados

A equação diferencial para o fluxo de água é normalmente referida como equação de Richards (RICHARDS, 1931). Esta equação descreve a mudança no armazenamento de água, redistribuição e absorção de água em cada ponto dentro do perfil do solo. O desenvolvimento da equação de Richards começa com a lei de Darcy. Na sua forma original, a lei de Darcy representou uma relação empírica entre a taxa de fluxo em areia saturada e gradiente de carga hidráulica. De acordo com Hillel (1982), a forma diferencial unidimensional da lei de Darcy para fluxo vertical é mostrada na Equação 2.31.

$$q_L = -k_s \frac{\partial H}{\partial z} \quad (2.31)$$

onde,  $q_L$  é a velocidade de descarga da água em um ponto ( $cm \cdot s^{-1}$ );  $k_s$  é condutividade hidráulica saturada ( $cm \cdot s^{-1}$ ); e  $z$  é a cota do ponto considerado ( $cm$ ).  $H$  corresponde à energia da água no solo expressa em termos de carga hidráulica ( $cm$ ). A lei de Darcy pode ser estendida para o fluxo não saturado substituindo a condutividade hidráulica do solo pela sua curva de condutividade hidráulica,  $k(\psi)$ :

$$q_L = -k(\psi) \frac{\partial H}{\partial z} \quad (2.32)$$

A Equação 2.32 deve ser combinada com a equação de continuidade para descrever o fluxo transiente. A equação de continuidade afirma que a mudança no teor de água em um volume de controle do solo deve ser igual à diferença entre o fluxo de água para dentro e para fora do mesmo volume. Para fluxo unidimensional, a equação de continuidade é

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q_L}{\partial z} \quad (2.33)$$

onde  $\theta$  é o conteúdo volumétrico de água ( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ ); e  $t$  é o tempo (s). Combinando as Equações 2.32 e 2.33 tem-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(\psi) \frac{\partial H}{\partial z} \right] \quad (2.34)$$

Deve-se notar que, se a carga correspondente ao potencial gravitacional ( $z$ ) é definida tomando-se a superfície do solo como a elevação de referência, esta assumirá sempre valores negativos, sendo o seu valor máximo obtido na superfície do terreno ( $z = 0$ ). Quanto à carga matricial, derivada da sucção mátrica, deve-se notar que esta reduz a energia da água do solo. Dessa forma, a energia da água intersticial ( $H$ ) é normalmente definida como:

$$H = z - \frac{\psi}{\gamma_w} \quad (2.35)$$

onde  $\gamma_w$  é o peso específico da água.

Usando a regra da cadeia,  $\partial\theta/\partial t$  na Equação 2.33 pode ser substituído por  $C(\psi) \partial\psi/\partial t$ , onde  $C(\psi)$  representa  $\partial\theta/\partial\psi$  (inclinação da curva de retenção). Com esta manipulação, a Equação 2.33 torna-se

$$C(\psi) \frac{\partial\psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(\psi) \frac{\partial H}{\partial z} \right] \quad (2.36)$$

Combinando as Equações 2.35 e 2.36 adicionando um termo  $S$ , para a absorção de água pelas plantas tem-se:

$$C(\psi) \frac{\partial\psi}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(\psi) \left( 1 - \frac{\partial\psi}{\gamma_w \partial z} \right) \right] - S(z, t) \quad (2.37)$$

onde  $S(z, t)$  indica que o termo  $S$  é uma função da profundidade e do tempo. As hipóteses adotadas na derivação da Equação 2.37 são:

- O fluido é incompressível;
- A fase de ar é contínua;
- A fase de ar está em pressão constante;
- O fluxo é unidimensional;
- O fluxo de água é isotérmico; e
- O fluxo de vapor é insignificante.

## 2.6 Balanço hídrico do solo

O balanço hídrico em um solo pode ser obtido a partir da avaliação dos componentes que contribuem com a entrada ou saída de água, numa determinada massa de solo, por um determinado período. A variação no armazenamento de água no solo ( $\Delta S$ ,  $mm \cdot dia^{-1}$ ) pode ser obtido da seguinte forma:

$$\Delta S = P - ET - R - I \quad (2.38)$$

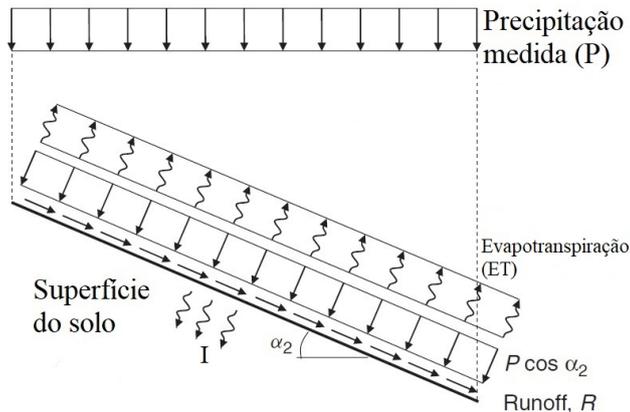
onde,

- $P$  é a precipitação, ( $mm \cdot dia^{-1}$ );
- $ET$  é a evapotranspiração, ( $mm \cdot dia^{-1}$ );
- $R$  é o escoamento superficial, ( $mm \cdot dia^{-1}$ );
- $I$  é a infiltração, ( $mm \cdot dia^{-1}$ ).

A precipitação é geralmente admitida como caindo verticalmente sobre a superfície e, posteriormente, após contato com esta superfície, a inclinação da superfície deve ser considerada. O escoamento superficial ( $R$ ) é definido a partir das parcelas da precipitação que não conseguem infiltrar no solo e que não evaporam durante o período da chuva. Estes processos são ilustrados na Figura 2.18 (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012).

Figura 2.18: Ilustração do fluxo de água na superfície associado ao escoamento superficial.

Fonte: adaptado de Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012)



Conforme ilustrado na Figura 2.18 o balanço de água na superfície do solo pode ser obtido durante o período em que ocorre a precipitação pela Equação 2.39.

$$R = P \cos \alpha_2 - I - ET \quad (2.39)$$

onde,

- $\alpha_2$  é a inclinação da superfície onde ocorre a precipitação, graus;
- $ET$  é a evapotranspiração, ( $mm \cdot dia^{-1}$ ).

## 2.7 Balanço de energia

A energia necessária para que ocorram as interações entre a superfície do solo e a atmosfera, tem sua origem no Sol na forma de radiação de onda curta. Durante o dia a superfície recebe radiação solar, eleva sua temperatura e transfere parte dessa energia para a atmosfera na forma de calor. No entanto, durante a noite a superfície tende a perder energia, ficando relativamente mais fria que a atmosfera, logo, durante a noite a direção das transferências de energia são invertidas. Considerada a superfície terrestre como um meio plano e sem vegetação, o saldo de energia disponível nesse sistema pode ser representado matematicamente como mostra a Equação 2.40.

$$R_n = H + Le + G \quad (2.40)$$

onde  $R_n$  é a radiação líquida,  $H$  é o o fluxo de calor sensível,  $Le$  o fluxo de calor latente e  $G$  o fluxo de calor no solo. Todos os fluxos são considerados normais à superfície e são expressos em unidades do SI em  $W \cdot m^{-2}$ , ou  $J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ . Convencionalmente, os fluxos  $H$  e  $Le$  são positivos quando tem o sentido da superfície para a atmosfera, e negativos quando em sentido oposto. Já o fluxo  $G$ , assim como  $R_n$ , são positivos quando no sentido da atmosfera para a superfície e vice-versa. De toda energia disponível, a parcela destinada ao aquecimento ou ao resfriamento da camada limite da atmosfera está relacionada ao fluxo de calor sensível. Já  $Le$  representa a parcela de energia com capacidade de calor de transformação, ou seja, diz respeito aos processos de mudança de fase da água, no caso a evaporação e a transpiração. O termo  $G$  é proveniente do meio subsuperficial, negativo durante o dia e positivo durante a noite.

### 2.7.1 Evapotranspiração

A evaporação é o processo em que, a água líquida é convertida em vapor e removida de uma superfície evaporante (i.e. lagos, rios, vegetação). A transpiração consiste da vaporização de água líquida contida nos tecidos vegetais e sua remoção para a atmosfera. A evapotranspiração é o processo de evaporação e transpiração ocorrendo simultaneamente (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração é um termo que vem sendo amplamente discutido e estudado pela ciência agrônômica. Penman (1948) definiu a evapotranspiração potencial (ETP) como o processo de transferência de água para a atmosfera, na unidade de tempo, de uma superfície totalmente coberta por vegetação verde, de baixo porte, em pleno desenvolvimento e sem restrição de água no solo. Anos mais tarde esse termo foi atualizado por Doorenbos e Pruitt (1977), no Manual 24 da FAO, que buscou generalizar o conceito associado à evapotranspiração, denominando-a como evapotranspiração potencial ( $ET_o$ ).

A evapotranspiração de referência é a taxa de evapotranspiração para uma extensa superfície, com cobertura gramada de altura uniforme, variando de 8 à 15 cm, em crescimento ativo, com o solo completamente sombreado e sem deficit de água.

A grande maioria dos métodos de estimação de  $ET_o$  requer informações meteorológicas

regionais. Esses métodos têm sido desenvolvidos e testados com emprego de diferentes elementos meteorológicos. Os quatro métodos apresentados no manual 24 da FAO - *Irrigation and Drainage*, o método de Blaney-Criddle, o método da Radiação, o método de Penman e o método da Evaporação de Pan, foram modificados para calcular o  $ET_o$  usando os dados climáticos diários médios para períodos de 30 ou 10 dias. O termo  $ET_o$  é expresso em  $mm \cdot dia^{-1}$  e representa o valor médio durante esse período. Doorenboos e Pruitt (1977) sugere que o método de estimativa seja escolhido baseado no tipo de dados climáticos disponíveis e na precisão exigida na determinação das necessidades de água.

O método modificado Penman oferece os melhores resultados com o mínimo erro possível, em torno de 10% no verão e de até 20% sob condições evaporativas baixas. O método Pan pode ser classificado em seguida com um erro possível de 15%, dependendo da localização (DOORENBOOS; PRUITT, 1977)

Como visto, a evapotranspiração é um fenômeno complexo e não-linear, pois depende da interação entre os vários elementos climáticos (radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade do ar) e do tipo, e estágio de crescimento da vegetação. O Relatório de Consultores Especialistas nos Procedimentos para Revisão do Roteiro da FAO, com relação a Previsões de Requerimento de Água pelas culturas, chegou a conclusão unânime que a equação combinada de melhor performance na estimativa de  $ET_o$  é a de Penman-Monteith (SMITH; ALLEN; PEREIRA, 1998).

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma_a \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma_a (1 + 0,34u_2)} \quad (2.41)$$

- $T$  é média diária da temperatura do ar a 2 m de altura, ( $^{\circ}C$ ).
- $u_2$  é a velocidade do vento à 2 m de altura ( $m \cdot s^{-1}$ );
- $e_s$  é a pressão da saturação de vapor, ( $kPa$ );
- $e_a$  é a pressão de vapor atual, ( $kPa$ );
- $e_s - e_a$  é o déficit de saturação de vapor, ( $kPa$ );
- $\Delta$  é a inclinação da curva da pressão de vapor versus temperatura, ( $kPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$ );
- $\gamma_a$  é a constante psicrométrica, ( $kPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$ ).

Os elementos climáticos para a estimativa da  $ET_o$  Penman-Monteith FAO ( $ET_oPM$ ) compõem um conjunto contendo temperatura máx. e mín., pressão de vapor real e atual, radiação líquida e velocidade do vento. Com este conjunto de informações torna-se possível estimar as diversas variáveis, conforme as equações que serão apresentadas.

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0,6108 \exp \left( \frac{17,27T}{T+237,3} \right) \right]}{(T + 237,3)^2} \quad (2.42)$$

O coeficiente  $\gamma_a$  é calculado empregando-se a expressão:

$$\gamma_a = 0,665 \cdot 10^{-3} P_{atm} \quad (2.43)$$

onde,  $P_{atm}$  é a pressão atmosférica em  $kPa$ .

$$P_{atm} = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (2.44)$$

onde,  $z$  é a altitude do local.

$e_s$  e  $e_a$  podem ser calculados utilizando-se as expressões a seguir:

$$e_s = 0,6108 \exp \left[ \frac{17,27T}{T + 237,3} \right] \quad (2.45)$$

$$e_a = \frac{e_s RH}{100} \quad (2.46)$$

Como são poucos os equipamentos disponíveis para determinação de  $R_n$  é comum que se faça a estimativa do saldo de radiação com base em outras variáveis. Dessa forma

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2.47)$$

onde,  $R_{ns}$  é o saldo de radiação de ondas curtas e  $R_{nl}$  é o saldo de radiação de ondas longas, ambos em  $MJ \cdot m^{-2} dia^{-1}$ .

O saldo de radiação de onda curta pode ser determinado conforme a equação a seguir:

$$R_{ns} = (1 - \alpha_s) R_s \quad (2.48)$$

onde,  $\alpha_s$  é o coeficiente de reflexão da superfície, o albedo.

A determinação do saldo de radiação de ondas longas se dá da seguinte forma:

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{(T_{max} + 273,16)^4 + (T_{min} + 273,16)^4}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so} - 0,35} \right) \quad (2.49)$$

onde,

- $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman ( $4,903 \cdot 10^{-9} MJ \cdot m^{-2} dia^{-1}$ );
- $T_{max}$  e  $T_{min}$  são as temperaturas máxima e mínima respectivamente,  $^{\circ}C^{-1}$ ;
- $R_{so}$  é a radiação solar incidente na ausência de nuvens,  $MJ \cdot m^{-2} dia^{-1}$

O valor de  $R_{so}$  pode ser calculado pela expressão:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5}z)R_a \quad (2.50)$$

onde  $R_a$  é a radiação solar no topo da atmosfera,  $MJ \cdot m^{-2}dia^{-1}$ , que pode ser obtida pela equação a seguir:

$$R_a = \frac{118,08}{\pi} dr [\omega_s \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \text{cos}(\varphi) \text{cos}(\delta) \text{sen}(\omega_s)] \quad (2.51)$$

onde, o valor de  $\varphi$  representa a latitude do local em radianos e  $dr$  é a distancia relativa entre a Terra e o Sol e pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$dr = 1 + 0,033 \text{cos} \left( \frac{2\pi}{365} J \right) \quad (2.52)$$

onde,  $J$  é o dia do ano (de 1 a 365 ou 366 caso seja ano bissexto). A declinação solar  $\delta$  é dada por:

$$\delta = 0,409 \text{sen} \left( \frac{2\pi}{365} J - 1,39 \right) \quad (2.53)$$

O ângulo horário  $\omega_s$  é calculado por:

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctan \left[ \frac{-\tan(\varphi) \tan(\delta)}{X^{0,5}} \right] \quad (2.54)$$

onde  $X = (1 - [\tan(\varphi)]^2 [\tan(\delta)]^2)$ . Quando  $X$  for  $\leq 0$ , utiliza-se um valor igual a 0,00001.

## 2.7.2 Radiação

A radiação emitida pelo Sol é uma radiação eletromagnética que se propaga no vácuo em todas as direções. Essa radiação é denominada eletromagnética, por se tratar do transporte de energia por meio da flutuação dos campos elétrico e magnético. Um corpo em qualquer temperatura emite radiações eletromagnéticas e essa radiação se propaga no espaço por meio de ondas, que não necessitam de um meio físico para serem transportadas (VILELA, 2010).

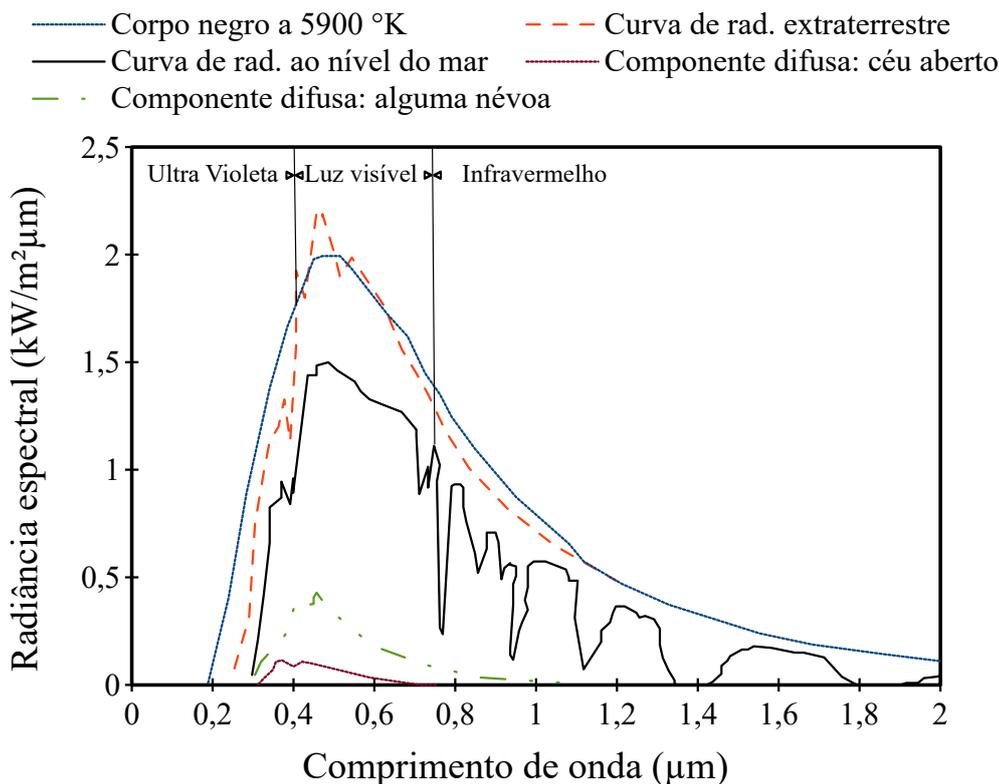
### Radiação emitida pelo Sol

O espectro solar é predominantemente térmico, tendo 99% dos comprimentos de onda da radiação solar entre  $0,2 \mu\text{m}$  a  $4 \mu\text{m}$ , sendo esta região denominada de ondas curtas (VILELA, 2010). Acima de  $4 \mu\text{m}$  são denominadas ondas longas. Do total da energia, as regiões do visível e o infravermelho próximo contêm a maior fração da energia solar. 46% da radiação está entre  $0,4 \mu\text{m}$  a  $0,7 \mu\text{m}$ , que é o visível, 9% encontram-se na faixa do ultravioleta e 45% na faixa do infravermelho, sendo que na faixa do infravermelho a maior concentração está no infravermelho próximo, compreendido entre os comprimentos de onda de  $0,75 \mu\text{m}$  a  $4 \mu\text{m}$ , No infravermelho distante, de  $4 \mu\text{m}$  a  $10 \mu\text{m}$ , a contribuição no espectro solar não é significativa.

A Figura 2.19 apresenta um gráfico típico do espectro solar onde se pode observar a curva teórica de um corpo negro na temperatura equivalente a do Sol, a curva do espectro solar acima da atmosfera e a curva do espectro solar abaixo da atmosfera, com seus respectivos picos de absorção pela atmosfera. Os picos de absorção na curva ocorrem por causa da seletividade de determinados componentes da atmosfera, para dadas bandas do espectro. A própria natureza do componente determina esta seletividade e os mais importantes são: o vapor d'água, o oxigênio, o ozônio e o dióxido de carbono. (VILELA, 2010)

Figura 2.19: espectro adaptado de palz.

Fonte: adaptado de Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012)



### Sensores de radiação

Com objetivo de padronizar os tipos de instrumento para medida de radiação solar, a Organização Meteorológica Mundial, através da Comissão para Instrumentos e Métodos, definiu a seguinte nomenclatura para os sensores de radiação solar. (WMO, 2008)

- Pireliômetro - Instrumento dedicado a medição da intensidade de radiação solar direta em incidência normal;
- Piranômetro - Instrumento para medida da radiação global (direta + difusa) recebida em todo hemisfério;
- Pirgeômetro - Instrumento destinado a medir a radiação atmosférica com todas as suas componentes absorvida por uma superfície negra na temperatura ambiente;

- Pirradiômetro - Instrumento para medida da radiação total (solar + atmosférica);
- Pirradiômetro absoluto - Instrumento de medida do fluxo de radiação absoluto, ascendente e descendente total, em uma superfície horizontal. O pirradiômetro absoluto também recebe a denominação de pirradiômetro de balanço.

Os sensores de medida de radiação solar também podem ser classificados de acordo com o tipo de variável que se pretende medir, o campo de visão, a resposta espectral e o emprego principal a que se destina. As principais propriedades dos radiômetros que são motivo de preocupação na avaliação da incerteza e da qualidade de medição de radiação solar são: a sensibilidade, a estabilidade, tempo de resposta, a resposta a lei dos cossenos, a resposta azimutal, linearidade de resposta, dependência com a temperatura e a resposta espectral conforme indica a Organização Mundial de Meteorologia - OMM. (WMO, 2008)

## **Simuladores de radiação**

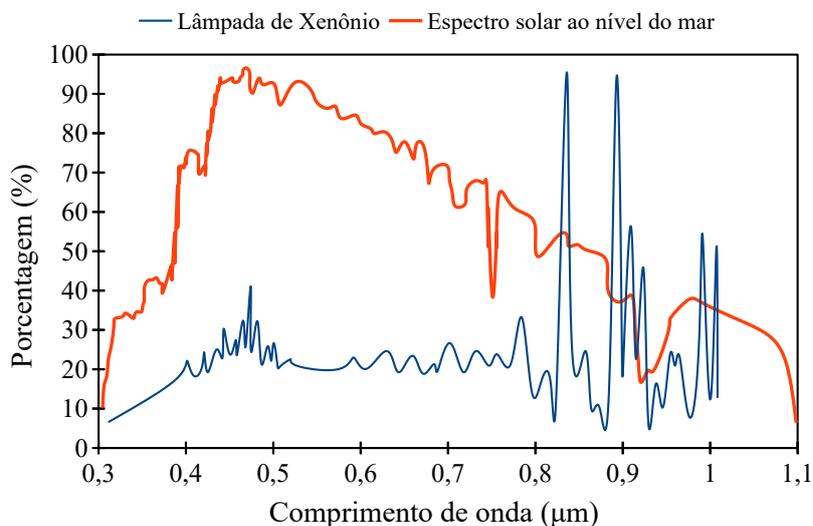
De acordo com Ekman, Brooks e Rhamdhani (2015) a aplicação e o projeto de simuladores solares se dividem em duas classificações principais, luz uniformemente distribuída não concentrada utilizada no teste de células fotovoltaicas e coletores solares de água quente solar, e concentradores de alto fluxo usados para gerar temperaturas superiores a 1000 °C usado para uma variedade de pesquisas e aplicações, incluindo processamento de materiais, reações de produtos termoquímicos, a produção de combustíveis solares e em simulações solares geração de energia térmica.

## **Fonte de iluminação - Lâmpadas**

A lâmpada é um elemento fundamental na concepção de um simulador solar por isso nos parágrafos seguintes serão apresentados alguns tipos de lâmpadas utilizadas em simuladores solares e suas respectivas semelhanças com o espectro solar da luz natural.

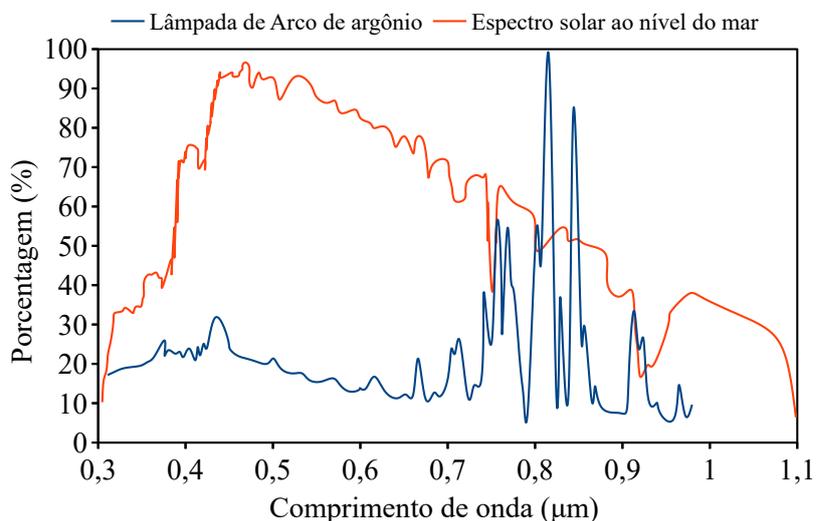
A distribuição espectral da radiação solar foi comparada por Ekman, Brooks e Rhamdhani (2015) com três lâmpadas (arco de xenônio, arco de argônio e vapor metálico), sobre o espectro solar, ele comenta que a maior parte da energia está dentro do comprimento de onda da luz visível de 0,35-0,70  $\mu\text{m}$  caindo acentuadamente na região UV e uma queda mais gradual no infravermelho próximo e distante. Em contraste, o espectro de emissão da lâmpada de xenônio mostrado na Figura 2.20 mostra um perfil plano de distribuição de baixa energia na região da luz visível com vários picos intensos no infravermelho. A emissão de luz visível constitui cerca de 25% da emissão total de luz, com a maior parte da energia situada na região espectral do infravermelho. Aproximadamente 70% da saída da lâmpada de arco de xenônio ocorre em comprimentos de onda superiores a 0,70  $\mu\text{m}$ , enquanto menos de 5% da saída consiste em comprimentos de onda inferiores a 0,40  $\mu\text{m}$ .

Figura 2.20: Lâmpada de xenônio e o espectro solar ao nível do mar.  
Fonte: adaptado de Ekman, Brooks e Rhamdhani (2015)



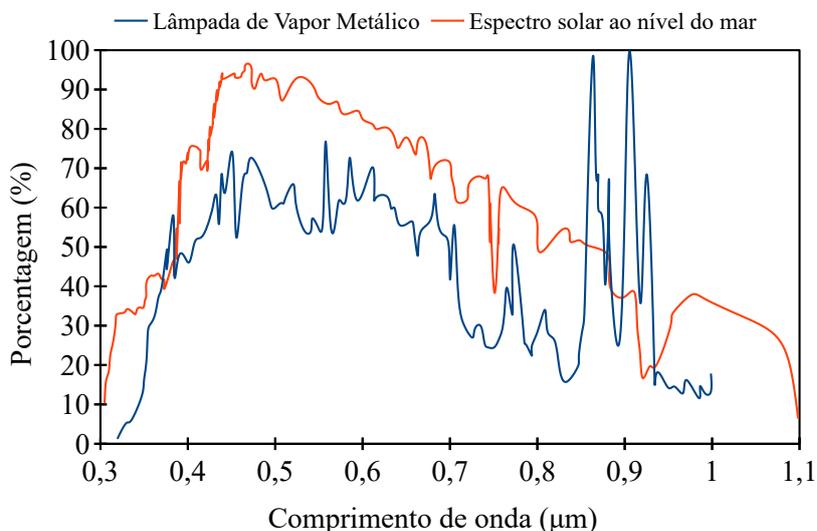
Da mesma forma com a lâmpada de arco de argônio na Figura 2.21, a figura mostra uma baixa emissão de energia na região de luz visível de  $0,38\text{--}0,70\ \mu\text{m}$  e picos de emissão de alta energia na faixa de  $0,70\text{--}1,00\ \mu\text{m}$ .

Figura 2.21: Lâmpada de argônio e o espectro solar ao nível do mar.  
Fonte: adaptado de Ekman, Brooks e Rhamdhani (2015)



A distribuição espectral da lâmpada de vapor metálico é muito semelhante à da luz solar natural como apresenta a Figura 2.22. O perfil de distribuição é bastante semelhante ao da luz solar, exceto por um pico em  $0,85\ \mu\text{m} - 0,95\ \mu\text{m}$ . O componente de alta energia da radiação está contido na faixa visível do espectro de  $0,40$  a  $0,80\ \mu\text{m}$ .

Figura 2.22: Lâmpada de vapor metálico e o espectro solar ao nível do mar.  
Fonte: adaptado de Ekman, Brooks e Rhamdhani (2015)



A lâmpada de vapor metálico é uma fonte de luz artificial que emite um espectro de radiação que imita muito bem o espectro da luz solar natural. Os intensos picos de energia infravermelha que as lâmpadas de xenônio emitem requerem resfriamento de ar forçado para lâmpadas de baixa potência ou resfriamento de água para lâmpadas de maior potência. Além disso, os refletores são mais propensos a danos e podem exigir resfriamento de ar forçado em sua superfície. No caso das lâmpadas de vapor metálico, aproximadamente, 90% da energia elétrica fornecida à lâmpada é convertida e irradiada como energia, e os 10% restantes são perdidos por efeitos ôhmicos para as lâminas e eletrodos. Cerca de 75% da energia consumida é irradiada pelo próprio arco de descarga. (EKMAN; BROOKS; RHAMDHANI, 2015).

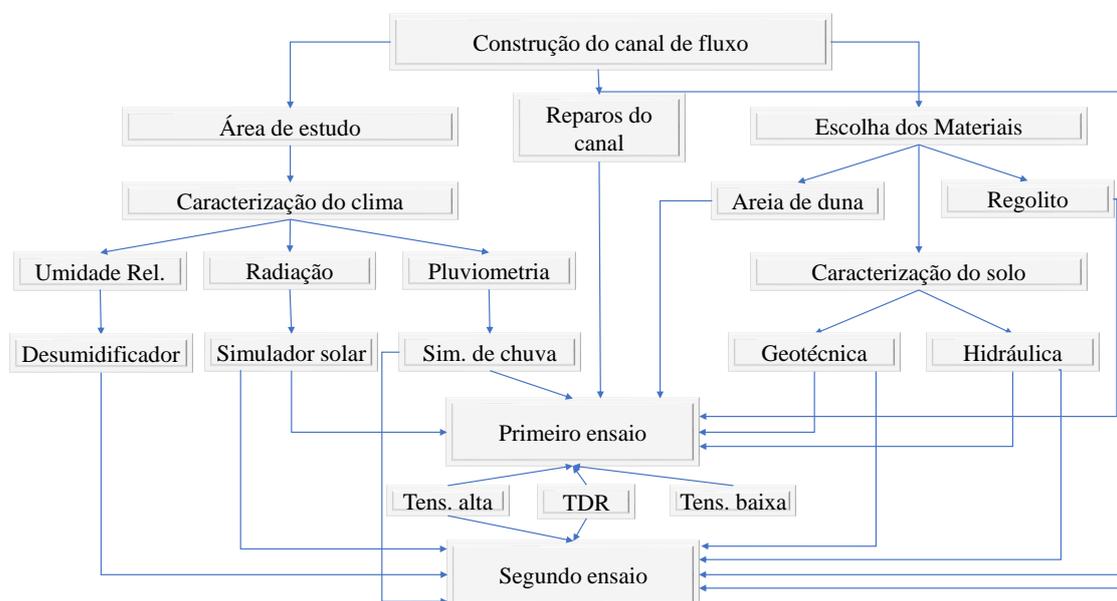
Devido aos critérios supracitados, ao custo acessível e a proximidade da distribuição espectral da lâmpada de vapor metálico à distribuição espectral solar ao nível do mar, a lâmpada de vapor metálico foi a escolha para a construção de simulador de radiação solar utilizado nesse trabalho.

# Capítulo 3

## Materiais, métodos e resultados preliminares

Neste capítulo serão apresentados os materiais, e também as atividades experimentais que foram realizadas para construção do canal de fluxo 2d, que permitiram avaliar o desempenho de duas diferentes configurações de coberturas finais de aterros sanitários, instrumentalizadas em laboratório, uma delas sob um ambiente climaticamente controlado. A Figura 3.1 apresenta um resumo simplificado das atividades metodológicas utilizadas nos dois ensaios realizados no canal de fluxo.

Figura 3.1: Resumo metodológico.



As diferentes barreiras foram compactadas em um canal hidráulico recuperado e readequado para a realização das simulações de infiltração em um sistema equivalente ao de uma cobertura de um aterro sanitário. Um pórtico foi adicionado à parte superior do canal permitindo a imposição de valores de radiação e de precipitação/intensidade controlados, sobre diferentes configurações de cobertura final de aterro.

A instrumentalização do canal contou com a utilização de sensores de umidade, sucção e temperatura do solo. Para o segundo ensaio realizado, foram também controlados valores de temperatura e umidade relativa do ambiente. Além de permitir a simulação de intempéries controladas em laboratório e o controle de variáveis que são relevantes para a análise do balanço hídrico na camada de cobertura, o canal também permite que as diferentes configurações de barreira sejam avaliadas em diferentes inclinações.

### 3.1 Área de estudo

A área de estudo desta pesquisa está situada na região do semi-árido nordestino. Para este trabalho a área de estudo foi delimitada conforme apresentado na Figura 3.2 pelas cidades de Barra, Irecê, Remanso e Petrolina, localizadas no estado da Bahia. As coordenadas no sistema UTM das estações meteorológicas estudadas são apresentadas na Tabela 3.1. Estas cidades são consideradas de médio a pequeno porte e os seus resíduos sólidos urbanos ainda são dispostos de maneira não controlada, infelizmente, em lixões.

Dessa forma, além das características climatológicas favoráveis à instalação de soluções de camadas finais de aterro utilizando barreiras capilares, tem-se ainda a demanda por soluções técnicas que tragam um destino adequado e sustentável ao RSU dessas pequenas cidades, o que agrega relevância ao estudo, no sentido em que auxilia nas tomadas de decisões acerca do gerenciamento dos RSU.

Figura 3.2: Área de estudo - Semi árido

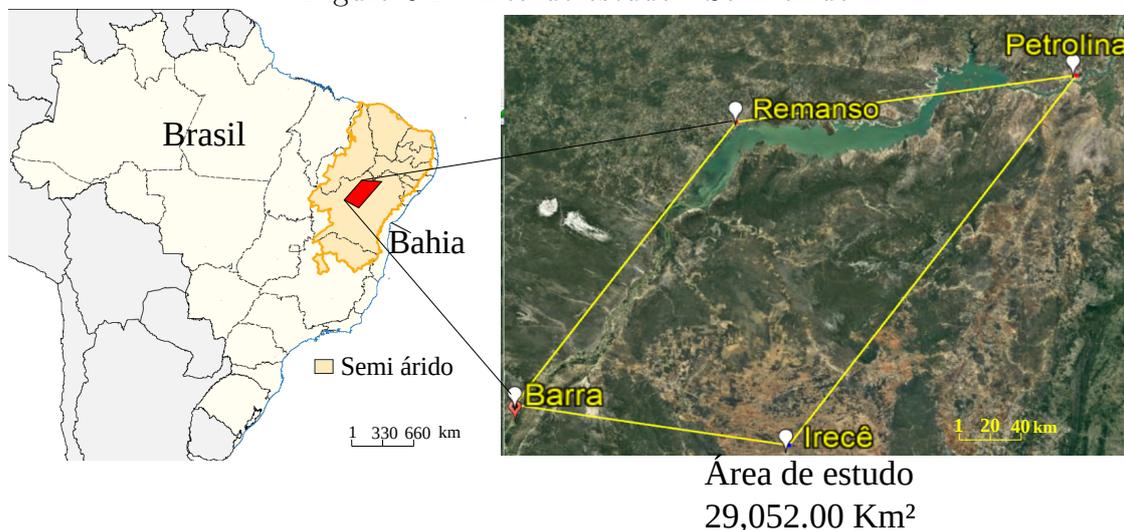


Tabela 3.1: Coordenadas das estações meteorológicas estudadas.

Estação	Zona	Longitude (m)	Latitude (m)	Altura (m)
REMANSO	23 L	818337,22 E	8937468,01 S	401,00
BARRA	23 L	703897,98 E	8774167,66 S	403,00
PETROLINA	24 L	337118,84 E	8962423,30 S	370,46
IRECE	24 L	188872,86 E	8747486,84 S	755,00

## 3.2 Condições climáticas simuladas

Baseado na área de estudo apresentada acima, buscou-se identificar as principais características climáticas (pluviometria, insolação, umidade relativa e vento). Dessa forma, as condições climáticas impostas ao canal em laboratório foram baseadas em medições meteorológicas de superfície coletadas pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) no período de 2010-2018, nas estações meteorológicas indicadas na Tabela 3.1.

### 3.2.1 Tratamento dos dados pluviométricos

O tratamento dos dados meteorológicos levou em consideração alguns critérios que buscaram uma maior confiabilidade e segurança quanto a sua representatividade. Desta forma, foram descartados dados relativos a anos com um número de meses com leituras inferiores a 10, assim como dados relativos a meses com número de dias monitorados inferior à 20.

As chuvas em sequência com valor inferior à 1mm foram somadas até que o valor unitário fosse atingido.

A Tabela 3.2 apresenta as frequências dos dados pluviométricos tratados, de cada uma das cidades estudadas, separados em seis classes de chuva, seguidos de suas respectivas frequências.

Tabela 3.2: Frequência e frequência relativa para diferentes intervalos de precipitação.

Precip. (mm)	Frequência				Frequência Relativa			
	Petr.	Remanso	Irecê	Barra	Petr.	Remanso	Irecê	Barra
0,0 † 12,5	909	734	828	935	89,29%	88,12%	92,00%	88,37%
12,5 † 25,0	79	83	58	83	7,76%	9,96%	6,44%	7,84%
25,0 † 37,5	19	15	14	30	1,87%	1,80%	1,56%	2,84%
37,5 † 50,0	9	1		8	0,88%	0,12%	0,00%	0,76%
50,0 † 62,5	0	0		1	0,00%	0,00%	0,00%	0,09%
62,5 † 75,0	2	0		1	0,20%	0,00%	0,00%	0,09%

Para a escolha das precipitações de interesse para serem simuladas no canal, os dados de todas as quatro cidades foram tratados de forma conjunta, sem distinção, por estarem em uma área com as mesmas características climáticas. Além disso, a análise estatística dos principais parâmetros pluviométricos mostrou-se semelhante, conforme apresentado na Figura 3.3, criada a partir dos dados da Tabela 3.2.

Na Tabela 3.3 são apresentados dados de precipitação horária com intervalos de precipitação definidos em função da porcentagem da precipitação acumulada anual que eles representam. Pode ser observado, por exemplo, que cerca de 75% da precipitação acumulada anual é composta por chuvas com precipitação horária inferior a 18,2mm.

Figura 3.3: Histograma de classes chuva horária das 4 estações.

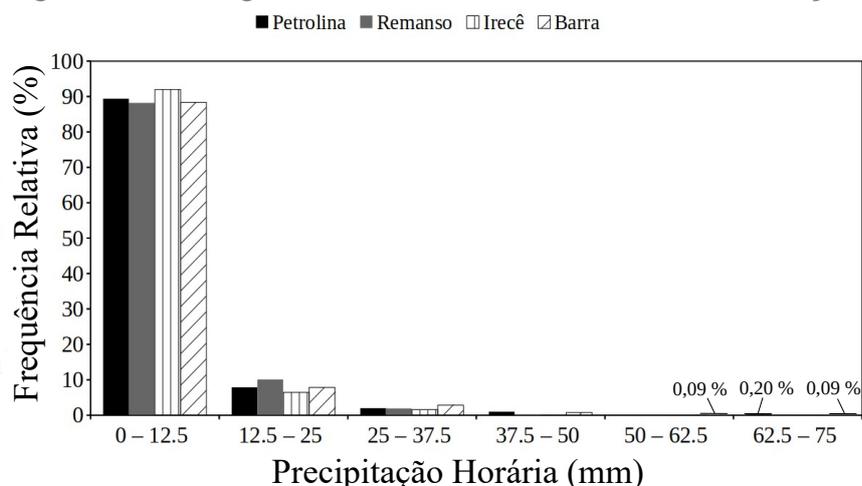


Tabela 3.3: Precipitação horária vs. Porcentagens anuais de chuva.

Precipitação Horária (mm)	Porcentagens das precipitações anuais (%)	Precipitação acumulada anual (%)
0,0 - 10,0	50	50
10,0 - 18,2	25	75
18,2 - 37,2	20	95
37,2 - 68,2	5	100

A Tabela 3.4 apresenta a precipitação média para os diferentes meses do ano no período e municípios analisados. A Tabela 3.4 também mostra o número de dias no respectivo mês em que ocorreram eventos de chuvas. Nas últimas quatro colunas da Tabela 3.4 é detalhada a distribuição de chuva adotada para cada mês seguindo os dados apresentados na Tabela 3.3. A título de ilustração, espera-se em janeiro uma precipitação total de 91mm na região, com 8 dias chuvosos. Esta precipitação foi então simulada utilizando 10 eventos horários de chuva de 5mm (cerca de 50% da precipitação prevista para estes meses) e um evento horário de 14mm e 25mm cada, totalizando 89mm. As chuvas horárias adotadas correspondem ao valor médio dos intervalos indicados na Tabela 3.3 e marcados como  $I_5$ ,  $I_{14}$ ,  $I_{25}$  e  $I_{45}$  na Tabela 3.4. Apenas um evento chuvoso de 45 mm/h foi adotado nas simulações, seguindo a frequência observada em campo para esta intensidade de chuva.

Tabela 3.4: Distribuição mensal das chuvas simuladas.

Mês	Precipitação média mensal (mm)	Dias Chuvosos	$I_5$ (mm/h)	$I_{14}$ (mm/h)	$I_{25}$ (mm/h)	$I_{45}$ (mm/h)
Janeiro	91	8	10	1	1	-
Fevereiro	69	8	11	1	-	-
Março	86	9	7	2	1	-
Abril	60	7	9	1	-	-
Mai	7	3	1	-	-	-
Junho	-	-	-	-	-	-
Julho	-	-	-	-	-	-
Agosto	-	-	-	-	-	-
Setembro	-	-	-	-	-	-
Outubro	26	4	3	1	-	-
Novembro	55	6	6	1	-	-
Dezembro	86	9	6	-	-	1

### 3.2.2 Tratamento dos dados de radiação solar

Para simular a incidência de radiação no solo foi desenvolvido um simulador solar, que buscou representar as condições de incidência de radiação de cada estação meteorológica estudada. De posse dos dados meteorológicos do período compreendido entre 2010 e 2018, foi determinada a média da radiação mensal para cada ano, como apresentado na Tabela 3.5, que corresponde aos dados da estação meteorológica de Remanso.

Tabela 3.5: Acumulado Mensal por Ano - Remanso -  $W/m^2$ 

	Radiação – Acumulado Mensal Remanso - $W/m^2$								
Ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Jan.	229.82	226.01	230.78	195.15	246.13	245.92	159.31	249.13	226.07
Fev.	192.51	200.10	206.51	224.52	195.13	181.47	225.00	184.47	173.88
Mar.	204.12	189.37	235.27	216.13	225.69	220.66	235.88	214.24	205.49
Abr.	192.47	205.47	212.87	194.94	188.68	197.98	214.10	207.20	196.74
Mai.	198.61	181.51	195.71	187.87	191.69	190.22	202.43	196.95	197.59
Jun.	172.62	181.27	180.33	180.59	181.85	179.46	190.34	189.70	188.71
Jul.	188.05	192.31	193.06	192.88	186.99	195.20	98.71	194.88	204.42
Ago.	218.60	214.04	211.31	216.77	220.51	221.13	167.30	223.48	219.85
Set.	228.28	178.34	226.11	231.85	232.15	235.34	187.90	230.89	230.93
Out.	225.17	127.49	252.19	248.18	238.96	245.81	236.45	251.01	235.57
Nov.	239.41	214.57	188.56	210.21	212.68	232.98	214.82	217.96	224.89
Dez.	194.21	235.19	221.56	191.03	159.31	239.45	225.18	218.95	206.44

O passo final para determinar a média diária de insolação foi estabelecer a relação entre os valores acumulados mensais e as suas respectivas horas de insolação obtidos também nos dados disponibilizados pelo Inmet. Os valores do exemplo de cálculo (estação Remanso) podem ser consultados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Acumulado Mensal por Ano - Remanso -  $W/m^2$ 

Ano	Acumulado Mensal - Radiação média por hora								
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Janeiro	434	434	434	434	434	434	434	434	434
Fevereiro	392	392	406	392	392	392	406	392	392
Março	434	434	434	434	434	434	434	434	434
Abril	420	420	420	420	420	420	420	420	420
Mai	434	434	434	434	444	434	434	434	434
Junho	420	420	420	420	420	420	420	420	420
Julho	434	434	434	434	434	434	434	434	434
Agosto	434	434	434	434	434	434	434	434	434
Setembro	420	420	420	420	420	420	420	420	420
Outubro	434	434	434	434	434	434	434	434	434
Novembro	420	420	420	420	420	420	420	420	420
Dezembro	434	434	434	434	434	434	434	434	434

A Tabela 3.7 apresenta os valores obtidos para todas as estações utilizando-se os passos supracitados.

Tabela 3.7: Radiação média horária das Estações Meteorológicas

Mês/Estação	Radiação média por hora - $W/m^2$				
	Irêce	Petrolina	Barra	Remanso	Média
Janeiro	464	422	476	514	469
Fevereiro	447	409	457	501	453
Março	439	388	452	498	444
Abril	400	349	409	479	409
Mai	360	280	394	445	370
Junho	339	279	380	435	358
Julho	366	312	395	422	374
Agosto	422	359	432	490	426
Setembro	471	400	483	524	470
Outubro	474	413	464	528	470
Novembro	442	414	459	517	458
Janeiro	453	395	454	484	447

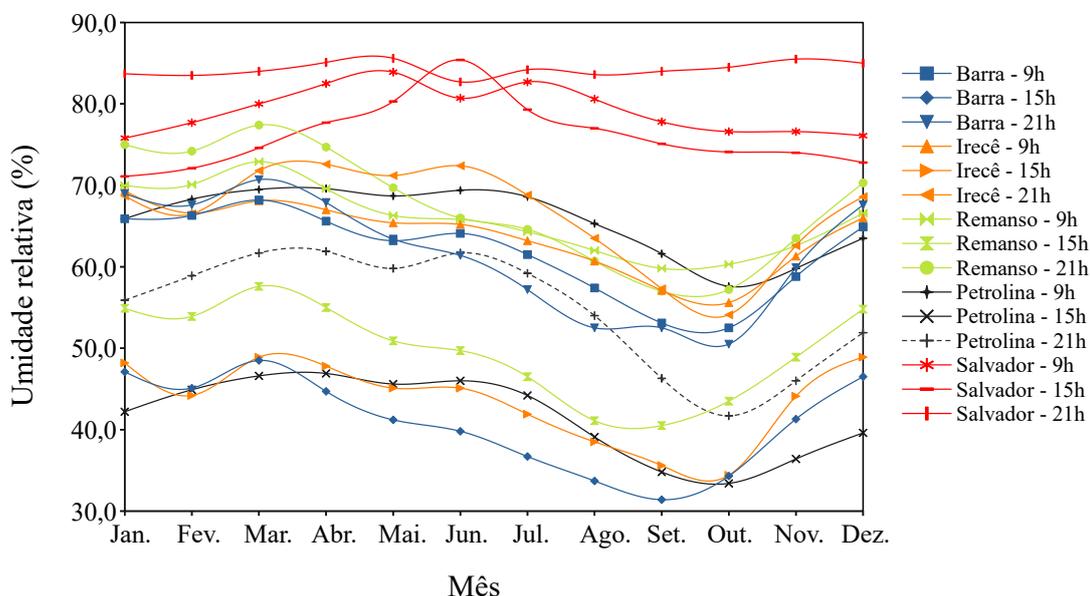
### 3.2.3 Tratamento dos dados referentes à umidade relativa

A necessidade do controle da umidade relativa surgiu das diferenças encontradas entre a umidade relativa do local estudado, região do semi-árido e o local da execução dos ensaios, litoral nordestino na cidade de Salvador, Bahia.

A Figura 3.4 apresenta a normal climatológica da umidade relativa mensal das estações de Remanso, Petrolina, Irecê, Barra e Salvador para o período compreendido entre 1981 à 2010. Os valores apresentados de umidade relativa são referentes às médias mensais obtidas

em três horários distintos ao longo do dia.

Figura 3.4: Normal climatológica - Umidade Relativa, das estações estudadas em relação à Salvador - Período de 1981 à 2010.



A partir da análise dos dados, é possível notar que a mínima umidade relativa ocorrida na cidade de Salvador na maior parte do tempo supera a máxima umidade relativa alcançada pelas cidades objeto de estudo desse trabalho. Como poderá ser observado nos resultados dessa pesquisa, essa diferença irá influenciar de maneira significativa na performance das barreiras simuladas.

O tratamento dos dados referentes à umidade relativa, assim como os dados de radiação e pluviometria foram analisados no período de 2008 à 2018. E assim como na Figura 3.4, são apresentados com os valores médios mensais para três diferentes horas do dia (9h, 15h e 21h), da mesma forma que foi apresentado na normal climatológica do Inmet. O tratamento isolado para cada cidade estudada foi realizado e é apresentado na Figura 3.5. Como produto final desta etapa foi obtida a média da umidade relativa das quatro estações. A Figura 3.6 apresenta o valor médio obtido a partir do tratamento dos dados das quatro estações analisadas.

Figura 3.5: Umidade relativa horária das quatro estações - Período de 2008 à 2018.

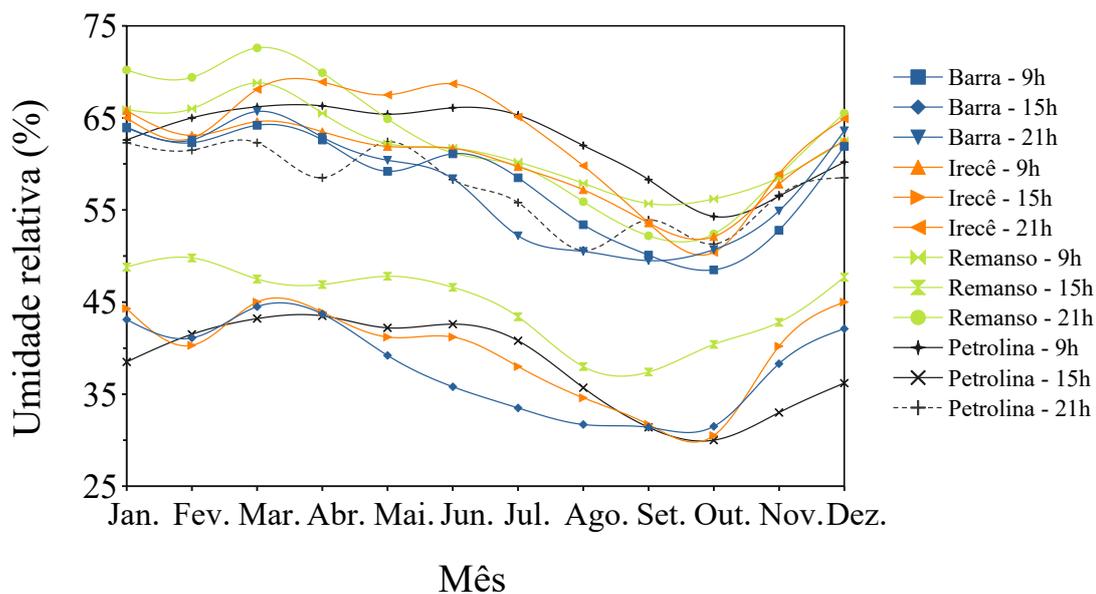
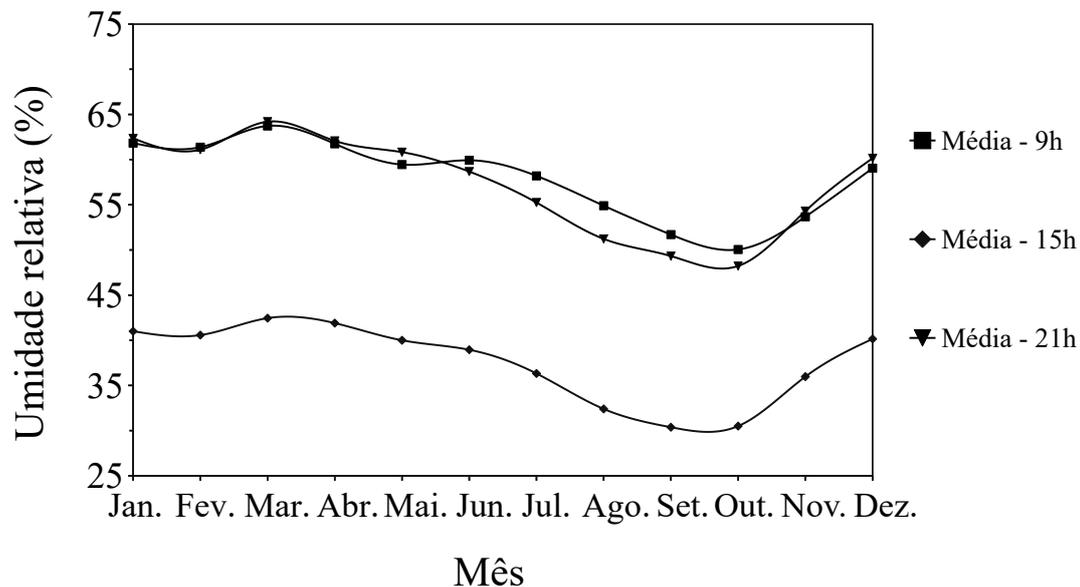


Figura 3.6: Média da umidade relativa horária das quatro estações - Período de 2008 à 2018.



Dessa maneira, buscou-se simular na sala climatizada uma umidade relativa que variasse dentro do intervalo de 30% à 65%.

### 3.3 Solos utilizados na pesquisa

Na presente seção são apresentados os resultados das caracterizações geotécnicas e hidráulicas dos solos. Para a realização dos ensaios de caracterização geotécnica tanto da areia de duna quanto do regolito, contou-se com o apoio do Laboratório de Solos da Universidade Católica do Salvador – UCSAL e do Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal da Bahia.

Dois solos com características físicas e hidráulicas distintas foram utilizados nessa pesquisa. O solo residual do granulito-gnaiss, também conhecido como regolito, tem sua origem na rocha granulítica, que é uma rocha composta essencialmente por quartzo, feldspato, hiperstênio e eventualmente granada e biotita. (IBGE, 1998). Trata-se de um solo de característica predominantemente argilosa, que já foi objeto de muitos trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA (GEOAMB) (SOUSA, 2012; ALMEIDA, 2016; CARDOSO, 2006; CARDOSO, 2011; AVILA, 2017; SOUZA, 2006). A Figura 3.7 apresenta o local de coleta do solo residual granulítico.

Figura 3.7: Local da coleta do solo residual granulítico.



Com o objetivo de alcançar um contraste hidráulico que favorecesse ao desempenho da barreira hidráulica, o outro solo avaliado nessa pesquisa é uma areia de duna. Sousa (2012) trabalhou com esse solo em sua pesquisa e de acordo com a autora, tratam-se de Sedimentos Quaternários, constituintes dos cordões litorâneos da Região Metropolitana de Salvador, composto de sedimentos arenosos, sem a presença de finos. É um solo de baixa superfície específica e baixa capacidade de cargas elétricas, que devido a seletividade do agente de transporte preponderante, o vento, possui curva granulométrica muito uniforme (pequena faixa de variação de tamanhos de grãos). A Figura 3.8 apresenta o local de coleta da amostra da areia de duna, as coordenadas UTM do local da coleta da areia de duna são E:573508,00 m e S:8571181.00 m, zona 24 L.

Figura 3.8: Local da coleta da Areia de Duna.



### 3.3.1 Caracterização geotécnica

A caracterização geotécnica dos solos estudados foi realizada de acordo com as especificações existentes nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Os ensaios realizados ao longo dessa pesquisa bem como as normas técnicas utilizadas estão abaixo listados:

- Umidade Natural e Higroscópica ( $w$ ): Realizado de acordo com a NBR 6457 da ABNT (1986);
- Peso específico dos Sólidos ( $\gamma_s$ ): Propriedade também determinada pela média de três ensaios de acordo com a NBR 6458 da ABNT (1984a), sendo utilizados os grãos passados na peneira N<sup>o</sup> 10 (#2 mm);
- Limite de liquidez ( $LL$ ): Determinado graficamente, a partir da interpolação de cinco pontos, realizado de acordo com a NBR 6459 da ABNT (1984b);
- Limite de plasticidade ( $LP$ ): O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 7180 da ABNT (1984c);
- Análise granulométrica: Determinada de acordo com os procedimentos da NBR 7181 da ABNT (1984d);
- Determinação do índice de vazios mínimo e máximo de acordo com a NBR 12051 da (ABNT, 1990; ABNT, 1991);

- Compactação dos solos: Determinada conforme prescrito na norma NBR 7182 (ABNT, 2016)
- Determinação do coeficiente de permeabilidade dos solos: De acordo com a NBR 15545 (ABNT, 2000) e NBR 13292 (ABNT, 1995);
- Índices físicos complementares: Com o fim de complementar a caracterização do solo em estudo, com base nos dados supracitados, foi realizada a determinação do índice de vazios ( $e$ ), porosidade ( $n$ ) e grau de saturação ( $Sr$ ), peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), índice de plasticidade ( $LP$ ).

A Tabela 3.8 apresenta de forma resumida o resultado da caracterização física dos dois solos.

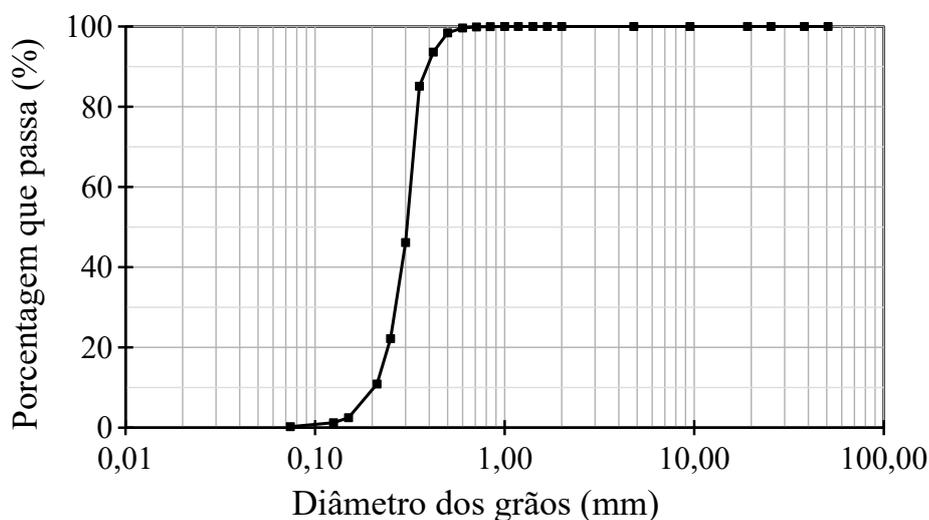
Tabela 3.8: Caracterização física dos solos

Solo	Granulometria (%)				Consistência (%)			$\rho_s$ $g \cdot cm^{-3}$	SUCS	Classificação ABNT - NBR 6502
	Ped.	Areia	Silte	Arg.	LL	LP	IP			
Areia de Duna	-	100	-	-	-	-	-	2,70	SP	Areia média a fina
Rigolito	2	27	18	53	72	42	30	2,79	MH	Argila areno-siltosa com vestígios de pedregulho

### 3.3.2 Caracterização geotécnica da areia de duna

Os dados apresentados na Tabela 3.8 e na Figura 3.9 mostram que a areia de duna foi classificada de acordo com a NBR 6502 como uma areia média a fina, e como uma areia mal graduada (SP) de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos - SUCS.

Figura 3.9: Curva granulométrica da areia de duna



Além da curva granulométrica, foram determinados outros índices físicos que são relevantes para analisar o comportamento da areia de duna. Estes índices são apresentados na Tabela 3.9 e servem para situar a densidade da areia utilizada nos ensaios com relação aos seus valores máximo e mínimo, permitindo o cálculo de seu grau de compactação relativo.

Tabela 3.9: Índices físicos da areia de duna.

$\gamma_s$	26,43 ( $kN \cdot m^{-3}$ )
$\gamma_{dmax}$	17,21 ( $kN \cdot m^{-3}$ )
$\gamma_{dmin}$	14,97( $kN \cdot m^{-3}$ )
$e_{max}$	0,75
$e_{min}$	0,52

### 3.3.3 Caracterização geotécnica do regolito

A Figura 3.10 apresenta a curva granulométrica do regolito. O solo foi caracterizado como uma argila areno-siltosa com vestígio de pedregulho de acordo com a NBR 6502 e como um MH (silte de alta plasticidade) pela SUCS. A Figura 3.11 apresenta a carta de plasticidade de Casagrande onde se observa os índices de consistência do solo e sua definição como um silte de alta plasticidade.

Na Figura 3.12 apresenta-se a curva de compactação do regolito, realizado na energia do proctor normal. Com base no gráfico apresentado pode se chegar a valores peso específico seco máximo ( $\gamma_{dmax}$ ) e de umidade ótima ( $w_{ot}$ ) de  $\gamma_{dmax}=14,13 kN \cdot m^{-3}$  e  $w_{ot}=29,67 \%$ . A Tabela 3.10 apresenta o resultados de pesquisas anteriores que utilizaram amostras compactadas, nesta tabela os valores de umidade indicados em asterisco correspondem às umidades ótimas de compactação.

Tabela 3.10: Comparação entre os valores de massa específica seca e umidade entre as pesquisas realizadas no Geoamb.

Pesquisa Geoamb	$\rho_s(g \cdot cm^{-3})$	$\rho_d(g \cdot cm^{-3})$	$w(\%)$
Avila (2017)	2,82	1,55	22,61*
Almeida (2016)	2,70	1,33	31,80*
Sousa (2012)	2,78	1,40	4,00
Cardoso (2011)	2,78	1,38	3,52
Presente pesquisa	2,79	1,41	29,67*

Sousa (2012) realizou análise de difração de raios-X (XRD), e identificou os principais compostos mineralógicos do solo granulítico. A pesquisadora descreve que além de picos de caulinita, o mesmos também apresenta picos de ilita, caracterizando assim uma argila não expansiva, comportamento visualizado ao longo dos ensaios realizados na presente pesquisa.

Figura 3.10: Curva granulométrica do regolito

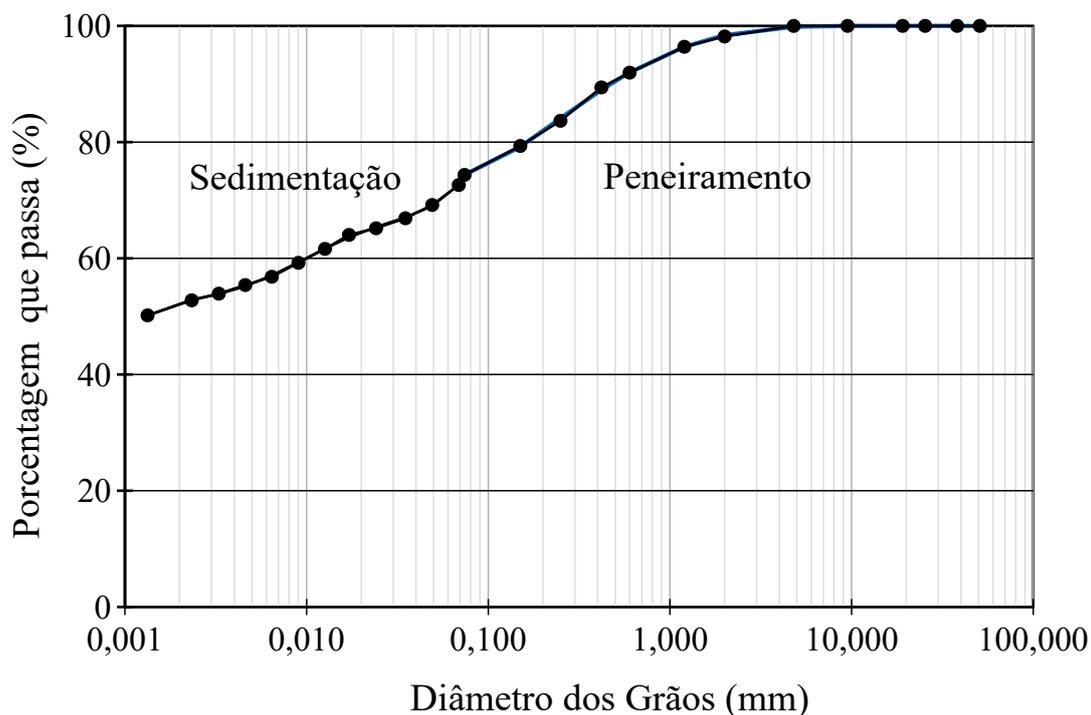
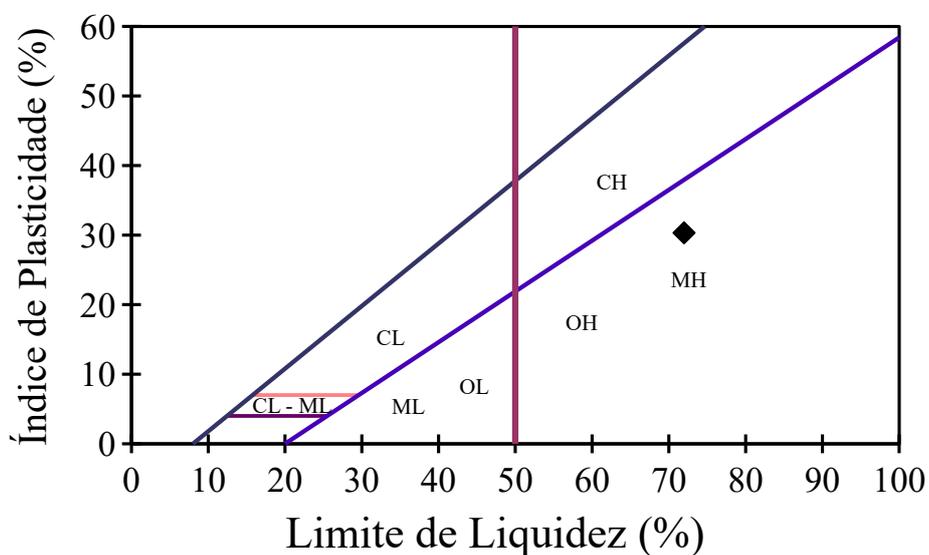


Figura 3.11: Carta de plasticidade do regolito

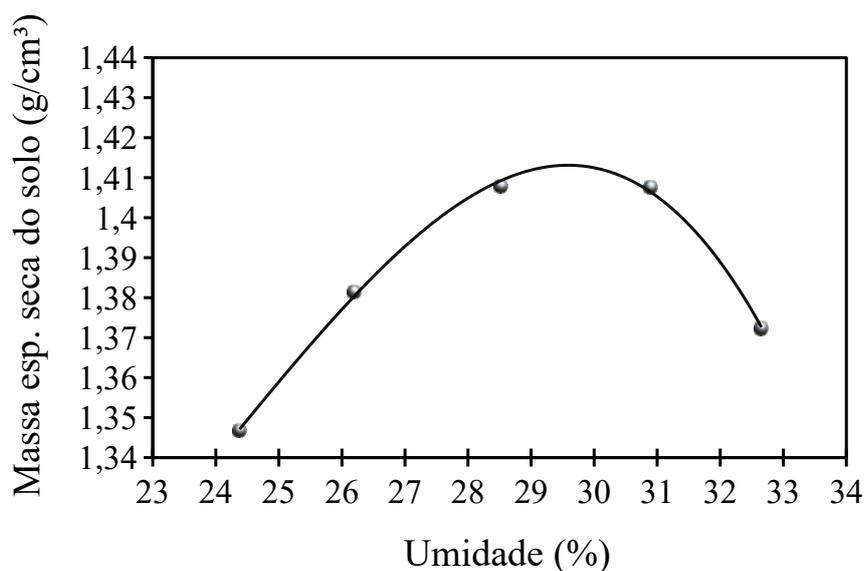


### 3.3.4 Caracterização hidráulica dos solos

A caracterização hidráulica dos solos utilizados nessa pesquisa, contou com a determinação de parâmetros relevantes para o entendimento da dinâmica da água nos meios porosos. Os parâmetros determinados foram a curva de retenção dos solos e a condutividade hidráulica saturada. A função hidráulica dos solos foi estimada com base na Equação 2.30.

Para a obtenção das curvas de retenção, três métodos foram aplicados, a saber: secagem

Figura 3.12: Curva de compactação do regolito



em câmara de pressão de acordo com Machado e Dourado (2001) e, método do potenciômetro de ponto de orvalho (PPO), métodos estes aplicados ao regolito; para o solo areia de duna foi aplicado o método de secagem por vaporização contínua da mesma forma que aplicado na pesquisa de Sousa (2012).

### 3.3.5 Curva de retenção do regolito

Para o levantamento do primeiro trecho da curva de retenção do regolito (valores abaixo de  $600kPa$ ), foi utilizado o equipamento desenvolvido por Machado e Dourado (2001), apresentado na Figura 3.13, no qual, as curvas de retenção são obtidas baseadas na metodologia proposta por Fourie e Papageorgian (1995).

A realização do ensaio requer inicialmente a colocação da amostra de solo sobre o disco cerâmico, para que a amostra seja levada a condições próximas a da saturação. Para isto, realiza-se o preenchimento da câmara com água até uma altura de aproximadamente 80% da amostra. Após um período superior à cinco horas, o volume de água não absorvido pela amostra é removido e na sequência, a câmara é fechada e uma pressão de ar é aplicada no topo da célula. Todos os registros são mantidos fechados, para que ocorra o equilíbrio entre o valor da pressão da linha de saída da câmara (linha de água) e o valor da pressão de ar aplicada no topo da câmara, valores estes que são acompanhados através do sistema e programa de aquisição de dados. Neste instante, o sistema é aberto para a drenagem de uma determinada quantidade de água do corpo de prova. Após drenagem do volume estabelecido, o sistema é fechado e parte-se para um novo estágio de equilíbrio de pressão.

Os novos valores de pressão de água vão ficando gradualmente menores devido ao aumento da sucção do solo, pela perda gradual das alíquotas de água. O ensaio então é composto de diversos estágios, onde cada novo estágio é iniciado após atingido o equilíbrio de pressão decorrente da drenagem da fase anterior. A cada estágio se conhece o volume

Figura 3.13: Câmara de pressão Machado e Dourado (2001), para ensaios de curvas de retenção.



drenado, no início do estágio; e a sucção ao final do estágio. Ao término do último estágio descomprime-se a câmara, retira-se e pesa-se a amostra que, em seguida, é colocada em estufa, para se determinar a quantidade de água existente no último estágio de sucção. O volume de água na amostra, relativo a cada estágio de sucção, é obtido somando o volume de água retirado no estágio anterior, permitindo a obtenção da umidade da amostra referente a cada estágio. De posse destes resultados e dos valores de sucção é efetuada a plotagem da curva de retenção da amostra (SOUSA, 2012).

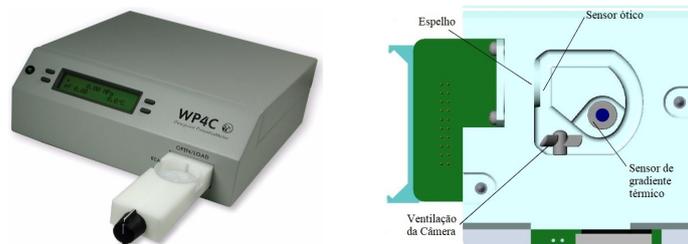
Essa técnica apresenta um excelente desempenho em solos com alta capacidade de retenção de líquido (solos argilosos), entretanto, em solos com baixa capacidade de retenção, como a areia de duna, a perda de água é muito alta no início do ensaio, ocasionando a perda dos pontos iniciais da curva de retenção, inclusive do importante valor da sucção que caracteriza a entrada de ar na amostra, inviabilizando assim a montagem completa da curva (SOUSA, 2012).

Os demais pontos da curva de retenção do solo argiloso (valores de sucção acima de 800  $kPa$ ) foram obtidos utilizando-se o método do PPO, utilizando o aparelho WP4C *Dewpoint PotenciaMeter*. O aparelho consiste em uma câmara selada com um ventilador, um espelho, uma célula fotoelétrica e um termômetro infravermelho (Figura 3.14). A amostra do solo é colocada em um recipiente de aço inoxidável ou plástico com um diâmetro de 40 mm e posteriormente esta é então colocada em uma bandeja e movida para a câmara com temperatura controlada. A espessura da amostra pode variar entre 1 e 5 mm. A câmara é fechada e a amostra do solo é equilibrada termodinamicamente com o ambiente da câmara. O ventilador acelera o processo de equilíbrio. Um sistema de resfriamento *Peltier* é usado para reduzir a temperatura na superfície de um espelho à temperatura do ponto de orvalho. A célula fotoelétrica detecta o primeiro sinal de condensação no espelho. A temperatura na qual a umidade aparece no espelho corresponde ao ponto de orvalho. A temperatura do ponto de

orvalho é medida usando um termopar. Um termômetro infravermelho é usado para medir a temperatura da câmara, que é assumida como sendo a mesma que a temperatura da amostra do solo em equilíbrio (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012).

Figura 3.14: Apresentação do Potenciômetro de Ponto de Orvalho.

Fonte: adaptado de Devices (2007)



(a) Potenciômetro de Ponto de Orvalho.

(b) Ilustração da parte interna da câmara.

A moldagem das amostras se deu por meio de um extrator elaborado especificamente para atender às dimensões das cápsulas do WP4C. A Figura 3.15 apresenta um corpo de prova já extraído e posteriormente acomodado na cápsula.

Figura 3.15: Extração de amostra para o PPO



(a) Amostra de solo sendo moldada

(b) Amostra pronta para o PPO

### 3.3.6 Curva de retenção da areia de duna

Para a elaboração da curva de retenção de água da areia foi empregada a técnica de vaporização contínua, que utiliza tensiômetros convencionais construídos no próprio laboratório (SOUSA, 2012). As amostras foram vibradas em uma capsula até atingir a densidade seca ( $\rho_d$ ) estabelecida de  $1,72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , correspondente à 70% da densidade máxima determinada por meio de ensaio de caracterização da areia de duna. Por meio de gotejamento, as amostras foram saturadas e imediatamente depois, os tensiômetros foram acomodados sobre o solo, com a ajuda de um suporte. A amostra foi mantida exposta à atmosfera do laboratório e a redução da massa do sistema ao longo do ensaio, foi monitorada, bem como, a sucção. O procedimento durou 6 dias. A Figura 3.16 ilustra a montagem do experimento.

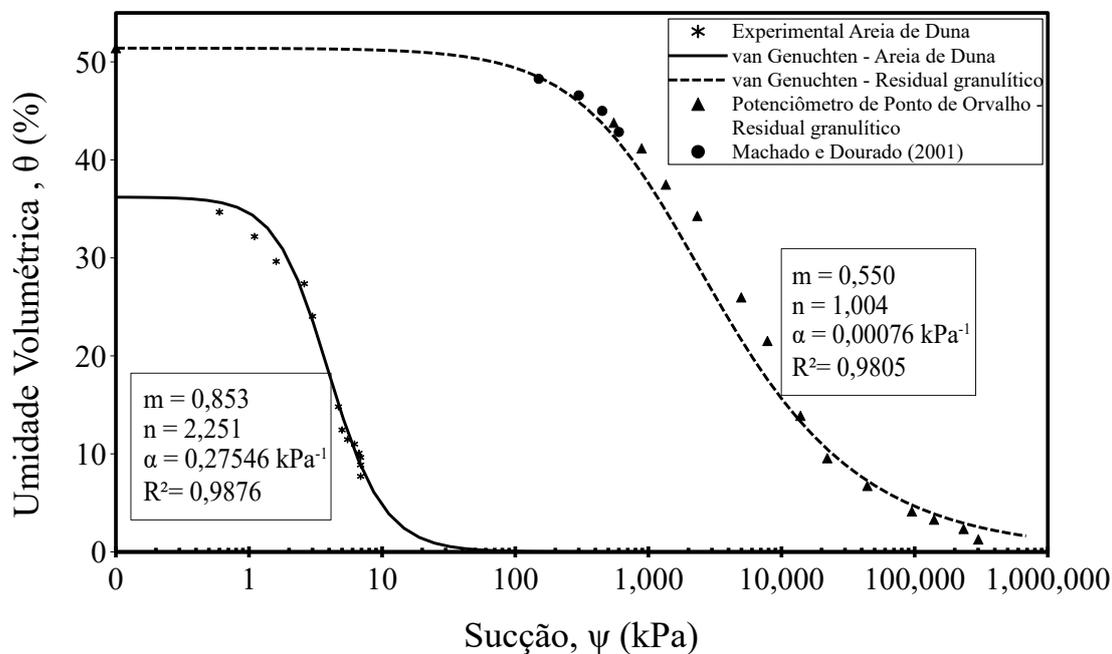
Figura 3.16: Montagem de experimento para obtenção da curva de retenção da areia.



### 3.3.7 Curvas de retenção dos solos

A curva de retenção da areia e do regolito são apresentadas na Figura 3.17 e foram obtidas conforme descrito na Subseção 3.3.6. Os dados experimentais de ambas as curvas foram ajustados utilizando-se o modelo de Van Genuchten (1980) e os parâmetros obtidos para estes solos apresentados nas próprias curvas de retenção.

Figura 3.17: Curvas de retenção do Rigolito e da Areia de Duna



### 3.3.8 Condutividade hidráulica

Na determinação da Condutividade hidráulica dos solos à água, foram realizados ensaios utilizando duas metodologias: carga constante; e carga variável. Para a areia de duna foi utilizado o procedimento com carga constante, devido à sua alta permeabilidade, enquanto que, para o regolito, utilizou-se a metodologia de carga variável.

Todos os ensaios foram feitos seguindo as orientações descritas nas normas da ABNT, sendo elas: ABNT (1995) e ABNT (2000). Os ensaios de permeabilidade no solo argiloso foram realizados em permeâmetros de parede rígida (solo compactado no próprio permeâmetro), a carga variável e a sua saturação ocorreu por fluxo ascendente, conforme as recomendações da norma. Após a realização dos ensaios de compactação e com a definição da umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima para cada uma das misturas, foram moldados corpos de prova utilizando cilindros em pvc para determinação do coeficiente de permeabilidade das amostras.

No caso da areia de duna, o experimento foi realizado também em um permeâmetro de parede rígida, só que com carga constante. A areia foi acomodada no cilindro de PVC em camadas de aproximadamente 3 cm tendo como meta uma densidade de  $1,72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Na Figura 3.18 é possível ver os corpos de prova sendo saturados para posteriormente ter seus coeficientes de condutividade hidráulica determinados.

Figura 3.18: Saturação dos corpos de prova para determinação da condutividade hidráulica do regolito



A partir dos procedimentos descritos anteriormente foram calculados os valores das condutividades hidráulicas saturadas de cada solo os quais são apresentados na sequência. Os valores de  $k_s$  foram obtidos a partir da avaliação de 3 corpos de provas compactados na energia do Proctor Normal e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.11:

A permeabilidade saturada da areia de duna foi determinada a partir do acompanhamento de três corpos de prova e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.12, a seguir:

Com os valores de  $k_s$  e as curvas de retenção obtidas, a função de condutividade hidráulica do solo argiloso e da areia de duna foram estimadas a partir da Equação 2.29,

Tabela 3.11: Valores de  $k_s$  para o regolito.

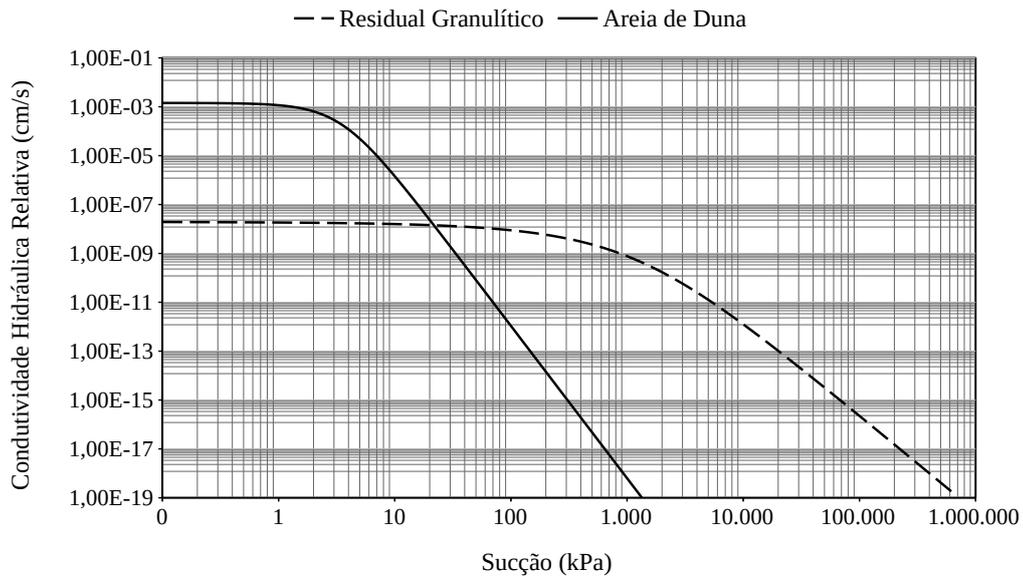
CP	$k_s (cm \cdot s^{-1})$
1	$1,84 \cdot 10^{-8}$
2	$2,04 \cdot 10^{-8}$
3	$1,83 \cdot 10^{-8}$

Tabela 3.12: Valores de  $k_s$  para areia de duna.

CP	$k_s (cm \cdot s^{-1})$
1	$1,28 \cdot 10^{-3}$
2	$2,51 \cdot 10^{-3}$
3	$1,13 \cdot 10^{-3}$

sendo apresentadas na Figura 3.19.

Figura 3.19: Função de condutividade hidráulica da areia de duna e do regolito



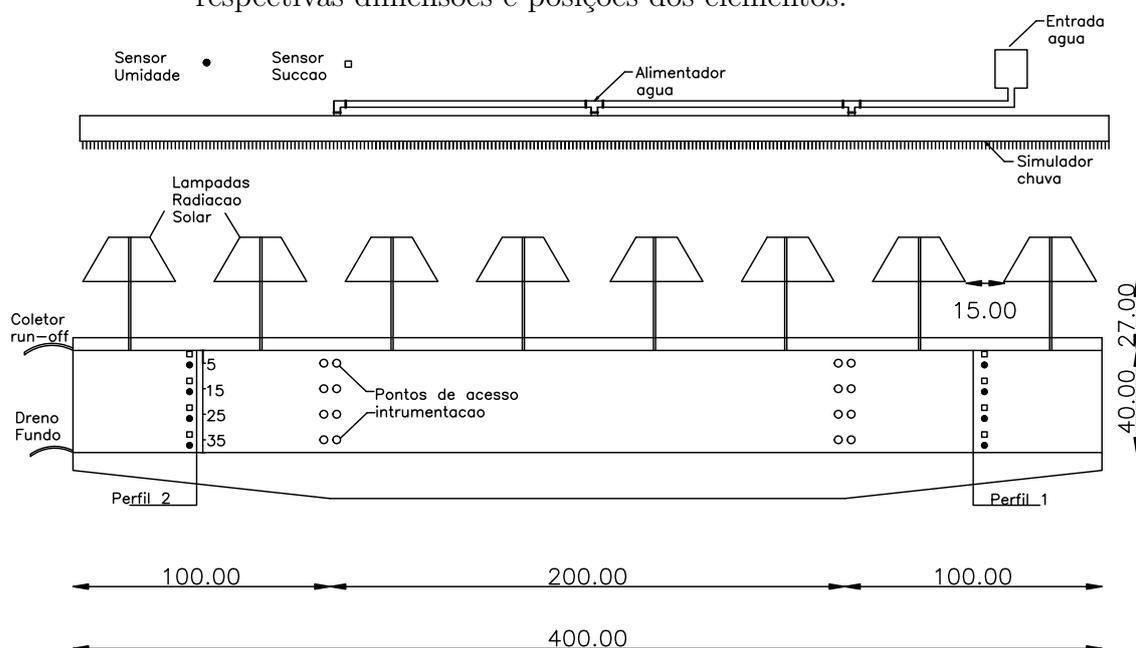
### 3.4 Desenvolvimento experimental

O desenvolvimento experimental tem seu início na definição da área de estudo, escolha e caracterização dos materiais, passando pela calibração dos instrumentos e chegando em fim à montagem e instrumentação do canal.

### 3.4.1 Canal de fluxo 2-D

O principal objetivo do canal instrumentado desenvolvido é permitir que diferentes configurações de cobertura sejam simuladas. O canal que possui dimensões de 4,00 m de extensão, com 0,40 m de altura e uma largura de 0,15 m. A Figura 3.20 mostra as referidas dimensões do canal, além de outras partes relevantes do sistema, como elementos dos simuladores de radiação e de chuva, pontos de acesso para as instrumentações, localização dos perfis de monitoramento utilizados no primeiro e segundo ensaios e posicionamento dos drenos de coleta das águas que escoam superficialmente e dos drenos de fundo. Conforme ilustrado na Figura 3.20, em cada perfil de monitoramento são instalados pares de sensores para medidas de sucção e umidade, nas profundidades de 5, 15, 25 e 35 cm.

Figura 3.20: Ilustração dos principais elementos do canal de fluxo 2d com as suas respectivas dimensões e posições dos elementos.



O canal utilizado nessa pesquisa é na verdade um canal hidráulico que era usado nos cursos de engenharia civil e de engenharia ambiental nas aulas práticas de hidráulica e que foi adaptado para simular o fluxo de água nos solos. Estima-se que o canal tenha uma idade aproximada de 35 anos e por isso uma reforma foi necessária.

Pelo seu tempo de uso e também pela nova finalidade de uso pretendida, boa parte de sua vidraria teve de ser reparada e ou reforçada, com o uso de vidros duplos e/ou mais espessos. Também, devido ao seu tempo de uso, o canal chegou com muitos pontos de corrosão e a sua vedação e estanqueidade tornou-se difícil. Os pontos de contato entre a superfície inferior do canal e os vidros foram alvo das principais ações para garantir a estanqueidade do canal. Após algumas tentativas preliminares, a solução que logrou êxito para a vedação do canal foi o uso de uma mistura de resina líquida com catalisador e microesfera de vidro.

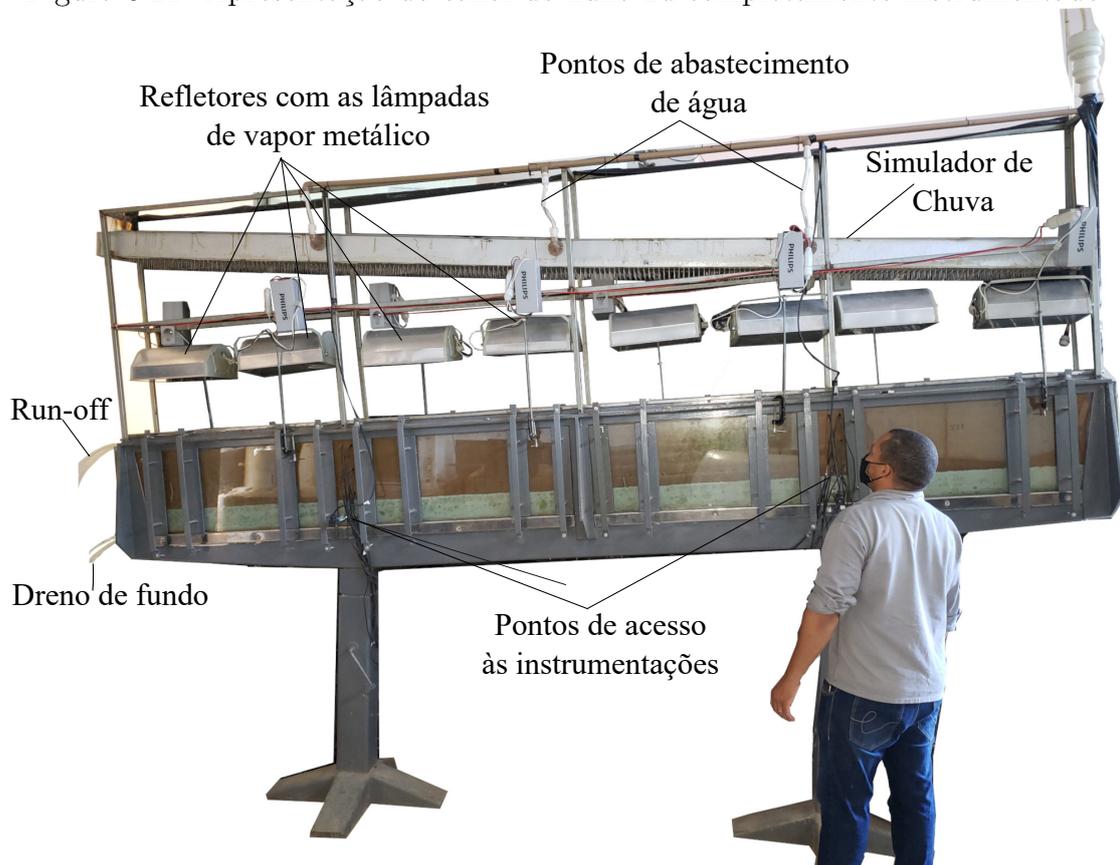
Além de permitir diferentes configurações de inclinação, a estrutura do canal permitiu o acoplamento de um pórtico que viabilizou a simulação da insolação e a imposição dos valores desejados de precipitação.

Os sensores que instrumentaram o canal foram os seguintes:

- Sensores de umidade do solo e medida de temperatura;
- Tensiômetros de alta e de baixa capacidade;
- Termo higrômetro digital.

A Figura 3.21 apresenta os diversos elementos ilustrados na Figura 3.20 montados para a realização de um dos ensaios realizados nessa pesquisa. Nesta figura são apresentadas as disposições das lâmpadas utilizadas no simulador solar, o simulador solar bem como os seus pontos de abastecimentos, a localização dos drenos das águas superficiais e infiltradas, os pontos de acesso das instrumentações inseridas no solo para o monitoramento das barreiras. O elemento de escala utilizado nessa figura é um homem com uma altura de 1,73 m.

Figura 3.21: Apresentação do canal de fluxo 2d completamente instrumentado.



Dando continuidade à apresentação dos diversos componentes que compõem o canal de fluxo de 2d a Figura 3.22 apresenta os pontos de saída dos drenos coletores das águas superficiais e dos drenos coletores de fundo.

Figura 3.22: Detalhe dos drenos de coleta superficial e do dreno de fundo.



### 3.4.2 Tensiômetros de baixa e alta capacidade

A análise do fluxo em meios porosos demanda a utilização de tensiômetros com características adequadas, tanto ao meio poroso, quanto ao líquido percolante. Nesta pesquisa, dois tipos de tensiômetros foram utilizados, buscando atender às diferentes texturas dos solos, um para altos valores de sucção (para solos argilosos) e outro para a faixa de sucção usual, entre 0 - 70 kPa (para solos arenosos).

Os tensiômetros de baixa capacidade utilizados são constituídos de um transdutor de pressão do tipo diafragma (Modelo MMKGPT, MK Controle e Instrumentação LTDA-EPP, São Paulo-SP) e de capa (em inox) com pedra porosa moldada por Sousa (2012) à partir de placas de material cerâmico alumina (Modelo 0604D04-B01M1, Soilmoisture Equipment Corporation, USA), colada em sua ponta. O tensiômetro permite leituras de sucção na faixa de 0 a 70 kPa. A pressão dos fluidos sobre os diafragmas dos transdutores geram sinais elétricos que são captados e convertidos em leituras de sucção através do controlador (MCI02-QC da HI Tecnologia Industria e Comércio Ltda). A Figura 3.23 mostra um dos tensiômetros utilizados no estudo.

O tensiômetro de alta capacidade utilizado (Modelo MPS-6, Decagon Devices) é um sensor que oferece leituras de potencial matricial e temperatura para longos períodos em qualquer profundidade e sem ser afetado por sais. De acordo com o fabricante (DEVICES, 2016), a amplitude do MPS-6 vai da capacidade de campo (cerca de 30 kPa) até a condição de solo seco ao ar.

Os sensores MPS-6 são compostos de um sensor de conteúdo de umidade e um substrato poroso com uma curva de retenção conhecida. Após se equilibrar energeticamente o conteúdo de água do material poroso do tensiômetro com o conteúdo de água do solo que está ao seu

Figura 3.23: Tensiômetro de baixa capacidade, a ser utilizado na instrumentação da areia de duna.



redor, o sensor de umidade mede a umidade do material poroso, e o sensor utiliza a sua curva de retenção para traduzir este valor de umidade para potencial hídrico (DEVICES, 2016). A Figura 3.24 apresenta o tensiômetro de alta capacidade utilizado nesta pesquisa.

Figura 3.24: Tensiômetro MPS-6.



Antes da realização dos ensaios no canal, ambos os tensiômetros foram calibrados previamente. Para o caso do tensiômetro de baixa capacidade, foram adotados os mesmos procedimentos anteriormente realizados por Sousa (2012) e Cerqueira (2016). O processo de calibração dos tensiômetros de baixa capacidade de sucção começa com a verificação da colagem das pedras porosas nas pontas dos tensiômetros, e em seguida, parte-se para a fase de saturação dessas pontas. Isto ocorre quando nota-se a extinção das bolhas de ar no sistema. Esse é um procedimento que evita, ou diminui, a possibilidade de ocorrer a cavitação durante as leituras de sucção com os tensiômetros.

Posteriormente, os tensiômetros foram montados, unindo-se cada ponta ao corpo do tensiômetro lentamente (ver Figura 3.25), para evitar que o acréscimo de pressão possa danificar as membranas do equipamento.

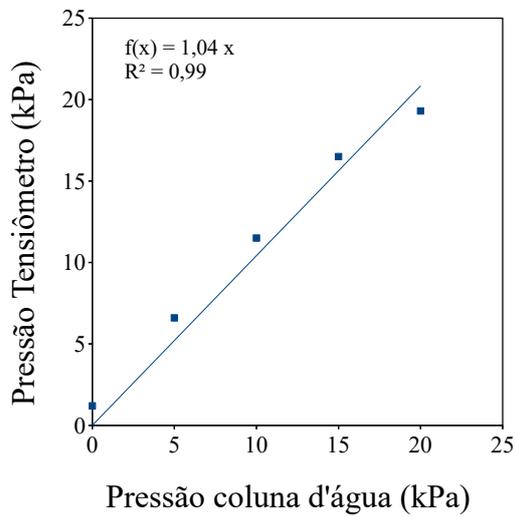
Utilizando-se de uma coluna de água aplicou-se uma pressão ou sucção na ponta de cada tensiômetro e registrou-se a resposta do sistema. Após a obtenção de alguns pontos de pressão ou sucção aplicada versus resposta do tensiômetro conferia-se, e, se necessário, ajustava-se, a calibração do tensiômetro.

Figura 3.25: Tensiômetro de baixa capacidade sendo acoplado à coluna de água para aplicação de pressão

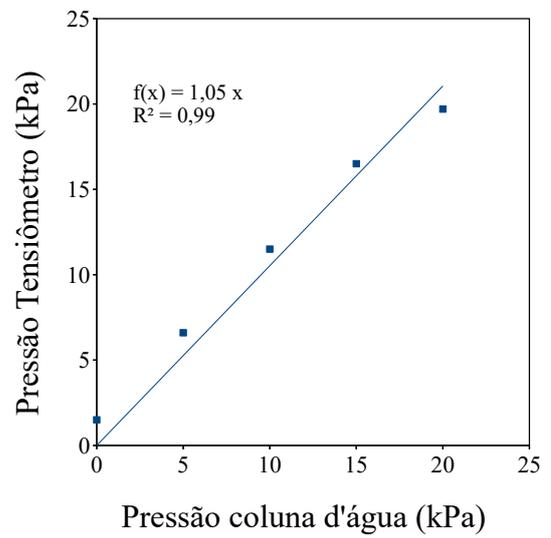


As Figuras 3.26 e 3.27 apresentam os dados obtidos na calibração dos tensiômetros que foram utilizados no solo areia de duna.

Figura 3.26: Calibração dos Tensiômetros 5G e 7A.

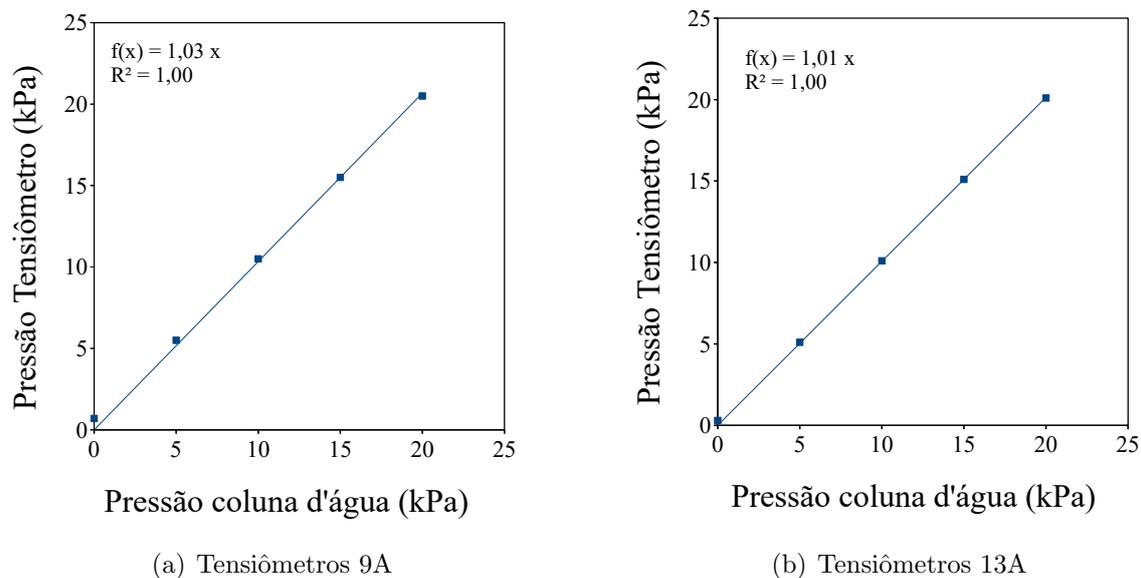


(a) Tensiômetros 5G



(b) Tensiômetros 7A

Figura 3.27: Calibração dos Tensiômetros 9A e 13A.



Como tentativa de calibração dos tensiômetros de alta capacidade de sucção, dois procedimentos foram adotados, a saber:

- Aplicação de diferentes sucções pelo método do equilíbrio de vapor.
- Aferição utilizando-se de medidas realizadas pelo PPO, a partir de amostras extraídas instantes depois do contato do tensiômetro com o solo;

A primeira tentativa de calibrar o tensiômetro MPS-6 da decagon foi de utilizar o método do equilíbrio de vapor, como indicado na Figura 3.28. Diferentes sucções foram impostas a partir da indução de uma umidade relativa em um ambiente hermético ao qual o tensiômetro foi exposto. Utilizando-se soluções com variadas concentrações de sal, diferentes pontos de sucção foram impostos, no entanto as respostas nas leituras dos tensiômetros não foram as esperadas, talvez por necessitarem da absorção de uma grande quantidade de água para atingirem o equilíbrio energético com o meio, o que requereria um longo tempo para que se processasse a transferência de água pela atmosfera.

Os valores de molalidade e suas respectivas sucções osmóticas na solução foram tomados com base na tabela apresentada no trabalho de Bulut, Lytton e Wray (2001), que apresenta valores tabelados de sucção osmótica para diferentes concentrações de solutos. De maneira sucinta e direcionada para o soluto utilizado nessa pesquisa, a Tabela 3.13 apresenta alguns valores de sucção osmótica em função da concentração de NaCl.

Para a aferição utilizando o PPO, uma amostra foi compactada com 2 tensiômetros instalados em uma única camada. Esta amostra era isolada do contato com a atmosfera, utilizando-se um papel filme em seu topo, para que ocorresse um equilíbrio e distribuição homogênea de sua umidade. Quando conectado ao sistema de aquisição de dados, os valores

Figura 3.28: Tentativa de calibração dos tensiômetros pelo método do equilíbrio de vapor.



(a) Tentativa de calibração nas Molalidades 0,5 e 1,0M



(b) Tentativa de calibração nas Molalidades 2,0, 3,0 e 6,0M

Tabela 3.13: Valores de sucção osmótica para diferentes concentrações de NaCl  
Fonte: Adaptado de Bulut, Lytton e Wray (2001)

Molalidade ( $M$ )	NaCl
0,00	5
0,05	234
0,10	463
0,50	2.283
1,00	4.641
1,60	7.631
2,00	9.757
2,50	12.556

Figura 3.29: Tentativa de calibração do MPS-6



de sucção eram facilmente monitorados e tomados. A Figura 3.29 ilustra o procedimento supracitado.

Após o período de 48h amostras deformadas e indeformadas eram extraídas para aferição de suas respectivas sucções no PPO, no entanto, encontrou-se uma discrepância muito grande entre os valores aferidos pelo MPS-6 e o PPO. Identificada a inconsistência nos dados obtidos, partiu-se para a busca do erro, sob a hipótese de que um possível mal contato entre o equipamento e solo pudesse estar gerando o problema, no entanto, como mostra a Figura 3.30 este não foi o problema.

Figura 3.30: Demonstração de contato entre o solo e o tensiômetro.



Apesar da frustrada tentativa da curva própria de calibração para este trabalho, foi depositada a confiança na calibração própria do equipamento pelo fabricante, além da confiança de sua utilização em pesquisas recentes no próprio GEOAMB (LIMA, 2018; SOUSA, 2018; ANUNCIAÇÃO, 2019).

### 3.4.3 Sensores de umidade

O sensor de umidade utilizado, para a determinação da umidade no perfil estabelecido da barreira capilar e na cobertura convencional, no presente trabalho, foi o 5TE da Decagon Devices. Na Figura 3.31 é apresentado o referido sensor. Os sensores (5TE - Sensor de Umidade, Condutividade Elétrica e Temperatura do solo) são produzidos pela Decagon Devices e utilizam a técnica de Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR).

Segundo a Devices (2016), todas as três medições (conteúdo volumétrico de água, temperatura e Condutividade Elétrica) são realizadas independentemente com o 5TE. O modelo 5TE possui um formato de garfo com três hastes de pontas finas (dimensões 10 cm x 3,2 cm x 0,7 cm), onde no centro das mesmas há um parafuso responsável por emitir frequências em ondas de 70 *Mhz*, o que minimiza os efeitos da salinidade e textura, tornando o 5TE preciso na maioria dos solos. O 5TE mede a temperatura com um termistor *onboard*, e a

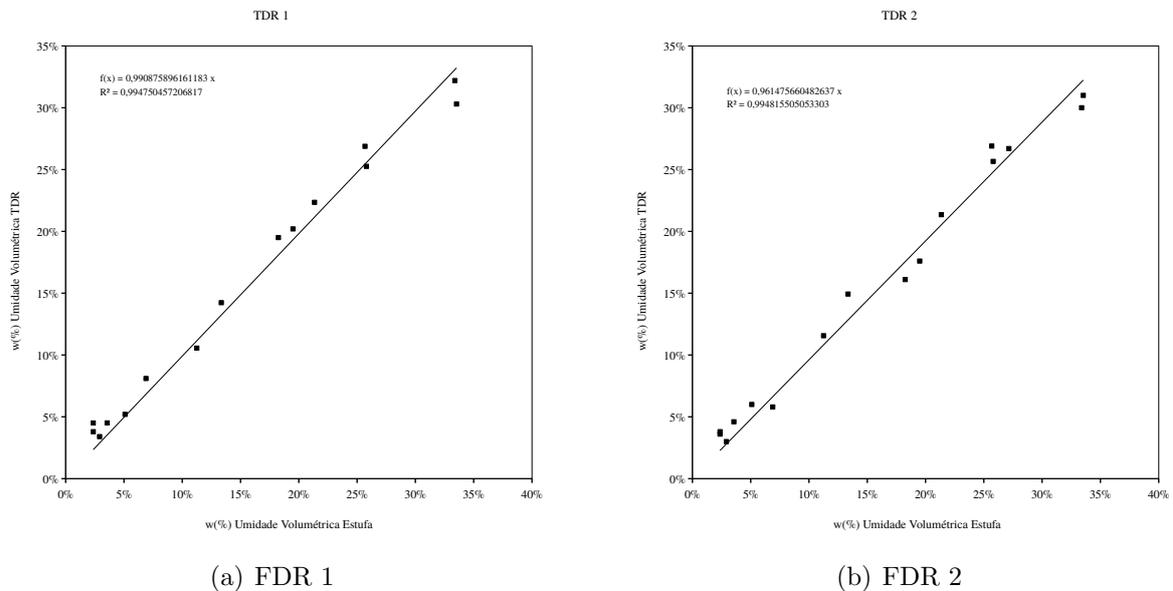
condutividade elétrica usando um conjunto de eletrodos de aço inoxidável. A temperatura e condutividade elétrica são calibrados de fábrica para todos os tipos de solo. A velocidade de medição da sonda 5TE é de 150ms (milissegundos).

Figura 3.31: Sensor de umidade 5TE.



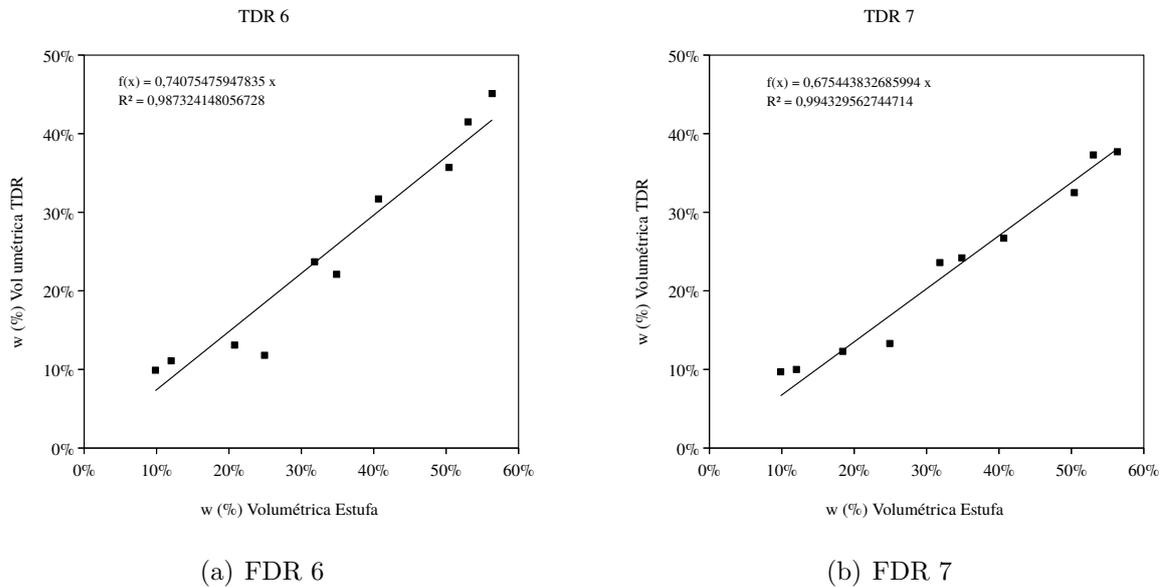
Todos os sensores utilizados para medidas de umidade foram previamente calibrados. De maneira a atender às especificidades dos dois solos estudados, os sensores de umidade foram separados de acordo com a textura dos solos que iriam compor as barreiras hidráulicas. A Figura 3.32 apresenta os dados referentes à calibração dos sensores 1 e 2 utilizados na areia de duna.

Figura 3.32: Calibração dos FDR's 1 e 2.



A Figura 3.33 apresenta os dados obtidos na calibração dos FDR's 6 e 7, utilizados no solo de textura mais fina (regolito).

Figura 3.33: Calibração dos FDR's 6 e 7.



Os demais gráficos das calibrações dos FDR's estão apresentados no Apêndice A.

### 3.4.4 Sistemas de aquisição de dados

Para os FDR's e para o tensiômetro de alta capacidade de sucção, o armazenamento dos dados foi realizado a partir da utilização do data Logger (EM50, Decagon, Estados Unidos) descrito a seguir, e estes dados foram posteriormente exportados através do Software (ECH2O Utility, Decagon, Estados Unidos) em formato de arquivo-texto, compatível com as planilhas eletrônicas mais utilizadas. A Figura 3.34 mostra o equipamento de aquisição de dados empregado.

Figura 3.34: Data logger EM-50.



A comunicação com este modelo é feita através de um cabo ps2 para USB ou ps2 para

serial para um PC ou dispositivo móvel portátil. O Em50 é um aquisitor de dados auto-suficiente de 5 portas especialmente adequado para pesquisa de campo e agricultura comercial. Estes dispositivos estão alojados em um invólucro resistente a intempéries, tornando-os adequados para operação externa a longo prazo (DEVICES, 2012). Para os demais equipamentos, as leituras e os armazenamentos foram realizados de maneira não automatizada.

### 3.4.5 Desenvolvimento do simulador de chuva

Visando a simular chuvas com diferentes intensidades, precipitando em um local específico, um simulador de chuva foi desenvolvido. A sua confecção foi inspirada em duas pesquisas anteriores, a saber: Nissen, Moldrup e Kachanoski (2000) e Vieira (2005). No trabalho desenvolvido por Nissen, Moldrup e Kachanoski (2000), nove agulhas hipodérmicas foram utilizadas para simular a infiltração de contaminantes em uma coluna de solo. Na pesquisa de Vieira (2005) um simulador de chuva foi desenvolvido acoplando-se seringas com agulhas à uma placa de PVC que posteriormente era colada em um tubo de PVC. Neste trabalho, um canal, posicionado no pórtico superior, com cerca de 1800 agulhas, foi confeccionado para permitir a simulação de diferentes intensidades de chuva. Na Figura 3.35(a) é possível ver o processo de inserção das agulhas e também o simulador de chuva já instalado no canal.

Figura 3.35: Montagem do simulador de chuva.



(a) Inserção das agulhas na calha



(b) Chuvímetro instalado acima do canal

O simulador desenvolvido no GEOAMB tem capacidade de reproduzir diferentes intensidades pluviométricas. Isto é possível variando-se a altura da lâmina d'água na calha do simulador. Diversos experimentos foram realizados variando-se a duração da alimentação de água no simulador para diferentes alturas de coluna d'água dentro do canal. As Figuras 3.36 e 3.37 apresentam os dados obtidos para as intensidade de chuva de 28mm/h e 72mm/h, respectivamente. A Tabela 3.14 apresenta os dados estatísticos utilizados para a produção da Figura 3.36.

A análise da Figura 3.36 e dos dados apresentados na Tabela 3.14 mostram que antes do estabelecimento de um regime de chuva estacionário há um aumento da intensidade de precipitação até que um valor aproximadamente constante seja estabelecido. O mesmo ocorre

Tabela 3.14: Valores médios referentes a seis curvas de precipitação 28 mm/h e seus respectivos valores de desvios padrões em relação à média.

Tempo (min)	Média	Desvio padrão
4,13	12,08	4,42
6,38	24,48	5,14
8,55	26,62	4,97
10,53	28,44	4,16
12,37	30,10	2,80
14,20	29,97	2,62
16,00	30,18	2,67
17,82	29,83	2,23
19,63	30,06	2,14
21,45	30,21	2,45
23,27	30,38	2,67
25,08	30,71	2,83
26,87	30,98	2,59
28,62	31,10	2,72
30,33	30,92	2,61
32,03	30,68	2,31
33,70	30,74	2,37
35,38	30,35	2,48
37,08	30,54	2,37
38,78	30,49	2,32
40,50	30,85	2,42
42,17	31,51	2,59
43,77	32,00	2,55
45,32	32,56	2,33
46,92	32,20	2,22
48,48	32,48	2,62
50,03	32,17	2,42
51,62	31,73	2,49
53,27	31,55	2,35
55,00	32,35	2,03
56,57	30,19	4,26
58,22	30,68	3,48
59,80	30,85	3,68
61,32	31,07	3,95
62,93	30,25	4,13
...	...	...
69,40	27,42	4,00
...	...	...
80,78	22,85	3,12
...	...	...
90,88	19,59	2,94
...	...	...
128,48	8,32	4,96

após a interrupção da alimentação de água no simulador de chuva. A Figura 3.36 apresenta o resultado correspondente à realização de seis diferentes ensaios repetidos para as mesmas condições (tempo de alimentação e altura da lâmina d'água). O mesmo procedimento embasou a criação da Tabela 3.15 e a Figura 3.37, esses procedimentos foram adotados para avaliar a repetibilidade das chuvas produzidas pelo simulador de chuva.

Figura 3.36: Curvas de calibração do simulador de chuva para um tempo de alimentação de 40min e uma altura de lâmina d'água de 0,2cm

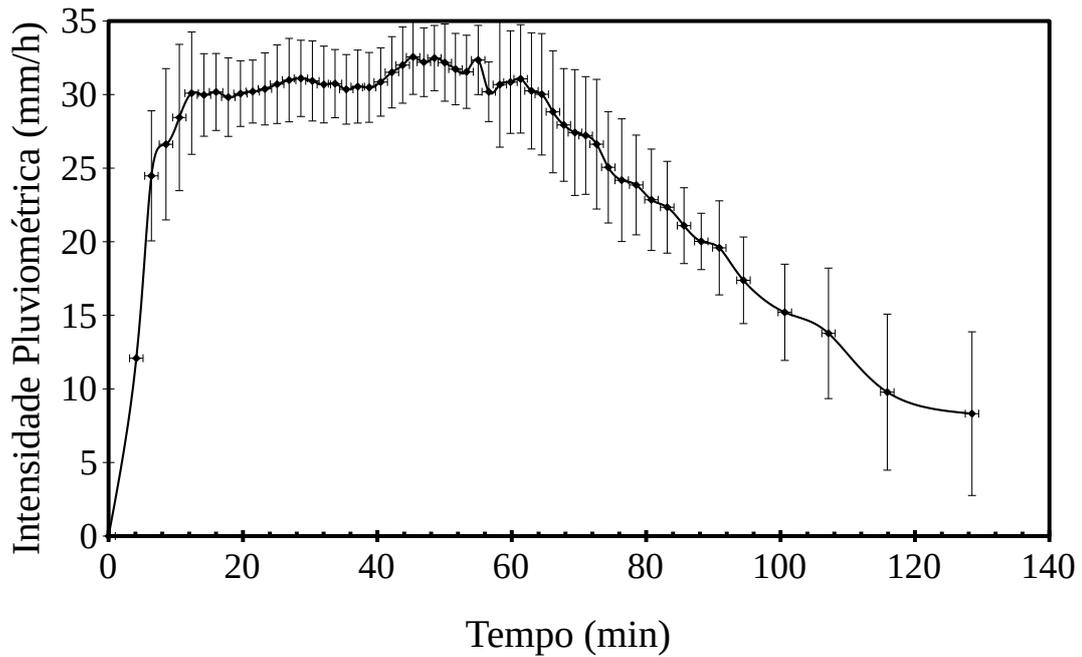


Figura 3.37: Curvas de calibração do simulador de chuva para um tempo de alimentação de 1h e 15min e uma altura de lâmina d'água de 0,2cm

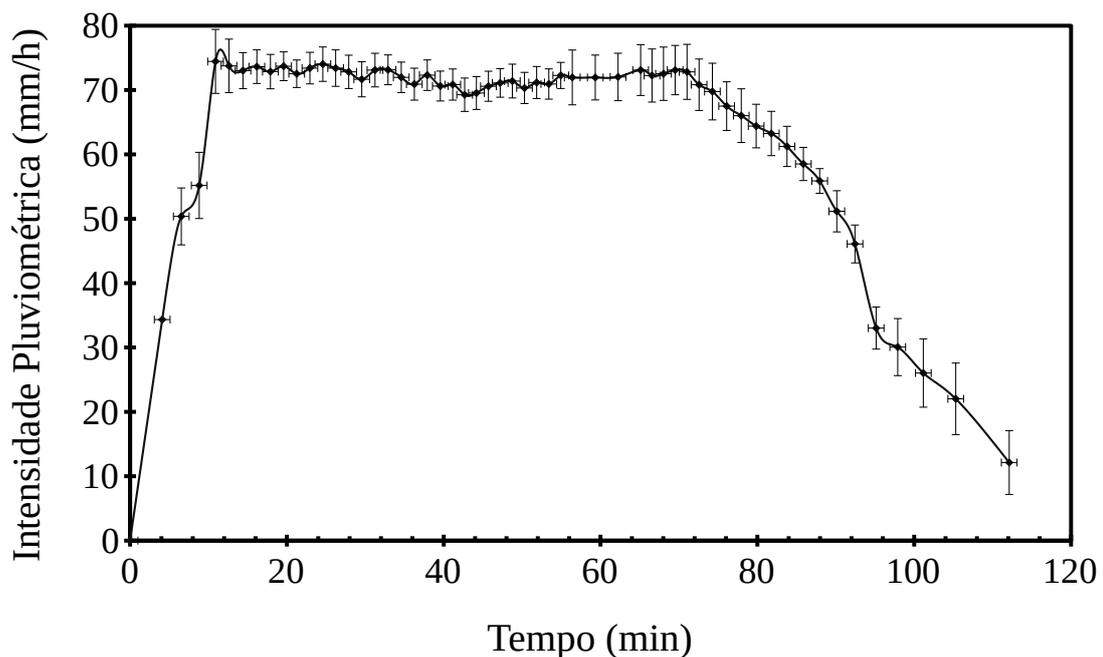


Tabela 3.15: Valores médios referentes a seis curvas de precipitação 72 mm/h e seus respectivos valores de desvios padrões em relação à média.

Tempo (min)	Média	Desvio padrão
4,10	34,34	3,21
6,53	50,37	2,39
8,82	55,18	2,07
10,90	74,45	1,52
12,62	73,75	1,49
14,40	73,02	1,17
16,17	73,63	1,68
17,90	72,86	2,38
19,58	73,70	0,75
21,25	72,53	1,43
22,93	73,41	1,13
24,58	74,02	1,47
26,22	73,41	1,13
27,88	72,82	1,46
29,55	71,67	1,53
31,23	73,10	0,71
32,90	73,14	2,05
34,58	71,97	1,95
36,25	70,91	2,98
37,90	72,31	2,81
39,57	70,62	2,77
41,15	70,85	2,06
42,67	69,27	2,82
44,17	69,53	2,80
45,70	70,59	2,29
47,20	71,10	1,39
48,75	71,39	1,68
50,30	70,32	2,46
51,85	71,17	2,78
53,40	70,94	3,33
54,93	72,27	2,10
56,40	71,96	1,68
59,33	71,95	1,29
62,23	72,03	2,97
65,12	73,10	0,71
66,57	72,25	1,81
...	...	...
81,78	63,25	3,48
...	...	...
90,13	51,16	4,02
...	...	...
112,12	12,13	5,47

### 3.4.6 Calibração do simulador solar

Tendo os dados com os alvos de radiação a serem simulados para a região do semi-árido, partiu-se para a calibração do simulador solar. Esta etapa contou com o apoio do professor Iuri Pepe e a infraestrutura do LAPO (Laboratório de Propriedades Óticas). Para realização da calibração do simulador de radiação solar foram utilizados uma luminária retangular, uma lâmpada de vapor metálico Philips HPI-400 W, um reator , um piranômetro modelo CMP-3 da marca Kipp e Zonen, com sensibilidade de  $12,43 \cdot 10^{-6} V \cdot W^{-1} \cdot m^{-2}$ , um suporte para luminária e um dispositivo para alterar a elevação do piranômetro. A Figura 3.38 apresenta o multímetro e o piranômetro utilizados na calibração.

Figura 3.38: Multímetro e Piranômetro utilizados na calibração.



(a) Multímetro digital RIGOL DM3062.



(b) Piranômetro CMP-3.

A Figura 3.39 apresenta uma das lâmpadas e um dos reatores que também foram utilizados na calibração, enquanto que a Figura 3.40 mostra uma visão geral do experimento. Considerando a área projetada da luminária foram marcados pontos para mapeamento da radiação que incide nos pontos demarcados nessa área. Para cada ponto foi realizada a variação da altura do piranômetro. A área abaixo da luminária foi dividida em 12 pontos, e para cada ponto 7 alturas diferentes foram definidas, variando a cada 2 cm, começando a partir dos 17 cm de distância do refletor até os 29 cm.

Figura 3.39: Reator e Lâmpada utilizados na calibração

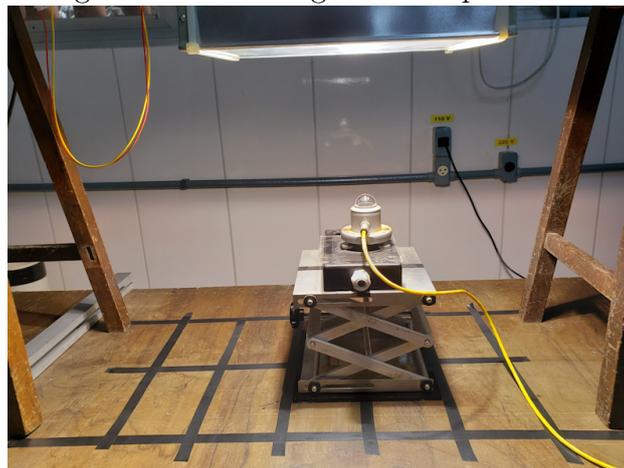


(a) Reator.



(b) Lâmpada vapor metálico em bocal cerâmico.

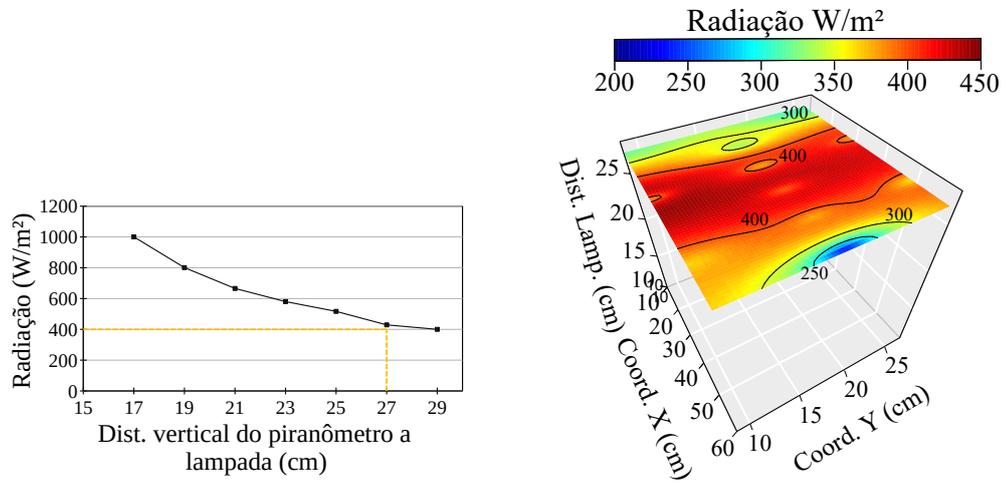
Figura 3.40: Visão geral do experimento.



Como produto final da calibração tem-se a distribuição da radiação por ponto, com 7 alturas analisadas, que permitem obter gráficos simples por posição e gráficos de superfície obtidos por meio de interpolação dos pontos. A Figura 3.41(a) apresenta a variação da radiação para diferentes alturas analisadas e a Figura 3.41(b) mostram o gráfico de superfície com a distribuição da radiação à uma distância piranômetro para a lâmpada de 27 cm.

Com base nos gráficos de superfície foi possível determinar a posição na qual se obteria a radiação média horária das estações estudadas no semi-árido da Bahia, que é da ordem de  $440 \text{ W/m}^2$ . A Figura 3.42 apresenta o primeiro dia de simulação das lâmpadas no ensaio em que foi simulada uma solução de camada final utilizando uma barreira.

Figura 3.41: Gráficos obtidos após calibração da lâmpada de vapor metálico.



(a) Variação da Radiação com a distância do foco.

(b) Distribuição da radiação para uma distância piranometro/lâmpada de 27cm.

Figura 3.42: Refletores posicionados.



### 3.5 Montagem e instrumentação do canal de fluxo simulando barreira capilar

O solo argiloso foi primeiramente submetido à secagem ao ar livre com o apoio de um sistema de secagem utilizando lâmpadas infravermelhas (para oferecer uma maior agilidade na secagem). A Figura 3.43 apresenta a preparação do solo durante a secagem. Após secagem, o solo argiloso foi destorroado. Embora a norma de compactação indique apenas o peneiramento como procedimento a ser efetuado, essa metodologia foi adotada para garantir que agregações formadas sob a umidade higroscópica fossem evitadas. Tendo sido destorroadas as amostras eram então homogeneizadas na umidade ótima de compactação (29,61%) e separadas em massas iguais para controle do lançamento da massa de solo para uma altura final de 1 cm por camada.

Figura 3.43: Preparação do solo argiloso para o primeiro ensaio.



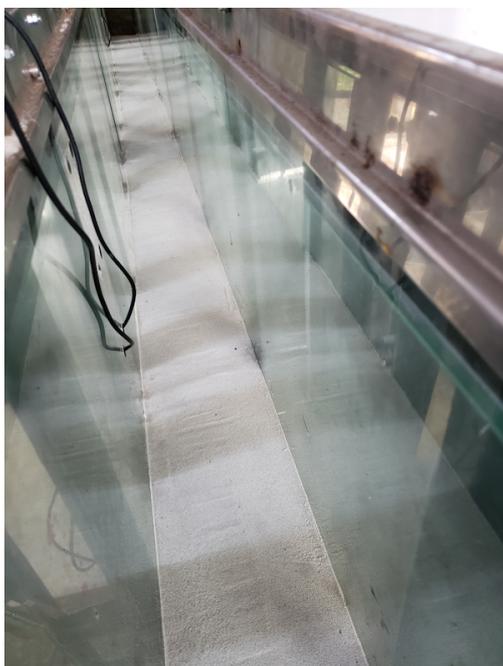
No caso da camada de areia de duna a secagem foi mais simples e o solo foi acomodado no canal usando uma placa adaptada às dimensões internas do canal como apresenta a Figura 3.44. Para atingir a densidade aparente seca de  $1,72 \text{ g/cm}^3$  foi utilizada a técnica sugerida por Diambra et al. (2010), onde é adicionada à massa seca de areia um teor muito baixo de água (1%).

Após serem lançadas no canal, niveladas em estado solto, as camadas de solo com altura inicial de cerca de 2 cm foram submetidas a uma leve pressão até atingir a densidade do solo seca desejada (Figura 3.45(a)). Foi adotada uma altura final de cerca de 10 cm para a camada final total de areia do fundo da barreira.

Figura 3.44: Acomodação das camadas de areia.



Figura 3.45: Primeiras camadas de areia sendo acomodada no canal.



(a) Fios da instrumentação aguardando avanço da camada de areia densificada.



(b) Controle da altura nos avanços da compactação da areia.

Após finalizar as camadas de areia, deu-se início a uma fase delicada, a compactação da primeira camada do regolito. Nessas primeiras camadas da interface, de maneira muito particular, não se pôde seguir os mesmos passos das suas sucessoras. Foi necessária a adoção de uma espessura de solo solto superior (Figura 3.46) às demais e a sua energia de compactação predominante adveio da placa e não do mini rolo compactador desenhado para o projeto. Para a sua compactação, as camadas de solo fino posteriores contaram com o auxílio de um mini rolo compactador desenvolvido para o projeto que buscava reproduzir um modelo de compactação similar ao rolo pé de carneiro, equipamento de grande porte utilizado para compactação de solos com alto teor de finos e alta plasticidade. Um tarugo de ferro fundido

foi readequado e nele foram inseridos pequenos pedaços (altura e diâmetro de 5 mm) de uma barra de aço para simular os dentes do rolo (ver Figura 3.47).

Figura 3.46: Lançamento da primeira camada de solo fino, interface areia argila.



Figura 3.47: Mini compactador utilizado na camada de solo fino.



À medida que as camadas eram compactadas, quando se atingia uma determinada cota, a compactação era interrompida para que se realizasse a inserção da instrumentação. Dessa maneira para garantir a correta inserção e a preservação da instrumentação do esforço advindo da compactação da camada superior, uma escavação com o molde da fiação e do próprio instrumento era realizada de maneira a inserir os instrumentos na camada já compactada e posteriormente compactar sem temores as camadas sobrejacentes. A Figura 3.48 apresenta o processo de inserção da instrumentação na camada de profundidade 25 cm, enquanto que a Figura 3.49 apresenta as instrumentações de um lado da barreira correspondentes à profundidade de 5 cm.

Figura 3.48: Instrumentação da camada de solo fino.



(a) Tensiômetro para altas pressões sendo inserido na camada de solo fino. (b) FDR inserido na camada de solo fino.

Figura 3.49: Instrumentação devidamente inserida na profundidade de 5 cm.



Os sucessivos avanços da camada de solo compactado podem ser vistos na Figura 3.50. Na Figura 3.50(a) é apresentada a frente de compactação na camada de profundidade de 25 cm enquanto que a Figura 3.50(b) apresenta a compactação referente à última camada.

Para finalizar a apresentação das instrumentações utilizadas no primeiro experimento, relacionado ao monitoramento da camada final de aterro utilizando uma barreira capilar, a Figura 3.51 apresenta a forma como o tensiômetro de baixa capacidade de sucção foi utilizado para realizar o monitoramento da sucção na camada de areia.

Figura 3.50: Vistas laterais do canal mostrando a compactação das camadas.



(a) Avanço das sucessivas camadas compactadas.



(b) Vista Lateral do canal, quando da compactação da última camada.

Figura 3.51: Inserção dos tensiômetros de baixa pressão.



(a) Tensiômetro de baixa localizado mais afastado do dreno.



(b) Tensiômetro de baixa localizado mais próximo do dreno.

## 3.6 Montagem e instrumentação do canal de fluxo simulando barreira convencional

Findada a primeira simulação o canal precisou passar por alguns reparos (ver Figura 3.52(a)). A Figura 3.52(b) apresenta o fim dos reparos e o canal já adequado para receber as camadas para o segundo experimento, que já foi realizado em ambiente controlado.

Para a montagem do segundo experimento foi necessária a mesma preparação para o solo argiloso (secagem, destorroamento e homogeneização) descrita anteriormente. A secagem do solo é apresentada na Figura 3.53.

Como nesse segundo ensaio a barreira teve não só a pluviometria e a radiação controladas, mas também a umidade relativa e a temperatura, foi tirado proveito dessas novas variáveis, e o ambiente foi climatizado à uma umidade relativa alta (aproximadamente 85%) durante a fase de preparação do solo. Dessa forma, após a climatização, as amostras foram acomodadas na sala de ensaio sob a utilização de um umidificador de ar que permaneceu ligado diuturnamente. A Figura 3.54 apresenta as amostras acomodadas após a homoge-

Figura 3.52: Execução de reparos após o primeiro ensaio.



(a) Troca do vidro e reparação do canal.



(b) Finalização dos reparos e início dos testes de estanqueidade.

Figura 3.53: Preparação da amostra para o segundo ensaio. Secagem.



neização na umidade ótima de compactação. A umidade relativa alta da sala foi adotada para mitigar eventuais perdas de água por evaporação após a imposição da umidade ótima no solo.

Assim como no primeiro ensaio, os tensiômetros foram saturados antes de serem utilizados. A saturação da pedra porosa dos equipamentos se deu com a submersão dos mesmos em água deionizada, lá permanecendo até o último instante antes de sua utilização no canal.

No processo de simulação do segundo ensaio, utilizando uma solução de cobertura convencional, com uma única camada de 40 cm de solo fino foi utilizada. Da mesma forma que no primeiro ensaio, as camadas foram lançadas em estado solto e posteriormente niveladas com o auxílio de um gabarito com 1,5 cm de altura. Suavemente foram acomodadas com o apiloador e posteriormente o mini rolo compactador finalizava a camada. A Figura 3.56 apresenta a instrumentação das camadas de profundidade 35 cm (a) e de profundidade de 5

Figura 3.54: Amostras homogeneizadas para o segundo ensaio.



Figura 3.55: Saturação dos tensiômetros MPS-6

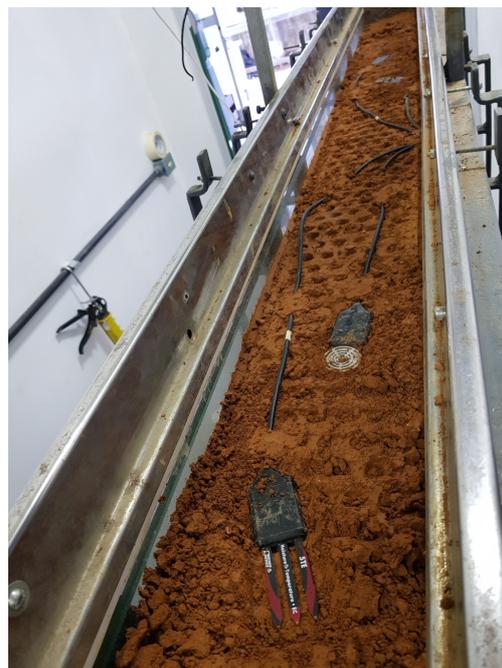


cm (b).

Figura 3.56: Instrumentação das camadas do segundo ensaio.



(a) Instrumentação na camada de profundidade de 35 cm.

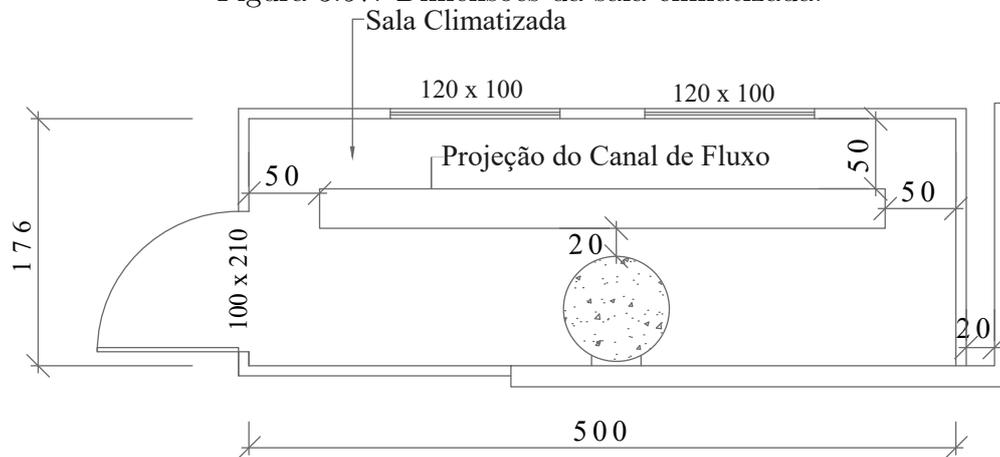


(b) Instrumentação na camada de profundidade de 5 cm.

### 3.6.1 Controle da temperatura e da umidade relativa

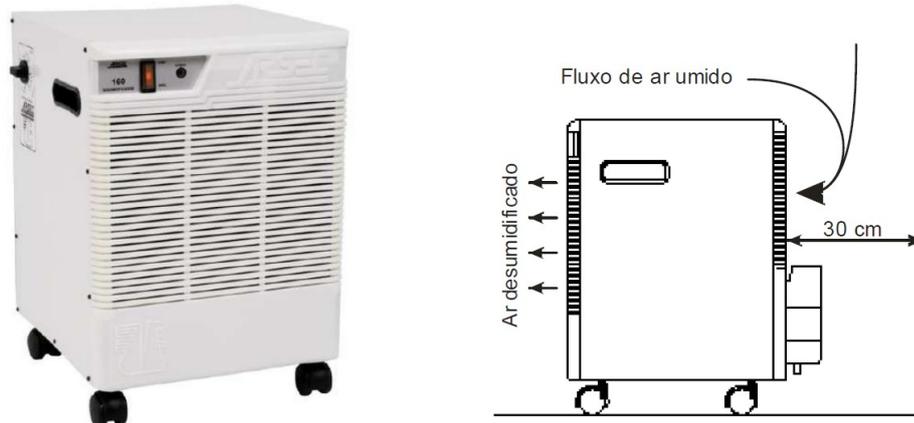
Para criação do ambiente com controle da umidade relativa e da temperatura foi necessária a vedação da área no entorno do canal. A construção da sala climatizada se deu por meio do uso de *drywall*, devido a critérios econômicos e pela própria celeridade da construção. A Figura 3.57 apresenta as dimensões da sala criada e a projeção da localização do canal de fluxo. A sala ocupa uma área de  $8,8 m^2$  e foi equipada com um condicionador de ar de 9000 BTU, para controle da temperatura e com um desumidificador para controle e redução da umidade relativa dentro da sala.

Figura 3.57: Dimensões da sala climatizada.



Como acima citado, o controle da umidade relativa do ar dentro da sala foi realizado com o auxílio de um desumidificador de ar ambiente da marca Arsec, como mostra a Figura 3.58(a). O funcionamento do equipamento é bem simples. Ele apresenta diferentes regulagens (umidostato) para redução da umidade do ar (muito seco (0-30%), normal(40-60%), úmido (70-80%) e muito úmido(90-100%)). Para o experimento foi utilizada a função no nível muito seco à normal, sendo que, em dias muito úmidos o equipamento era definido para trabalhar à 30%, em dias menos úmidos à uma umidade relativa de 40%.

Figura 3.58: Instrumentação das camadas do segundo ensaio.



(a) Desumidificador utilizado no controle da umidade relativa da sala.

(b) Esquema de funcionamento do desumidificador.

O aparelho começava a retirar a umidade do ar até que alcançasse a umidade definida, e então ele desligava por si próprio. Uma serpentina de captação da umidade era responsável pela retirada da água do ambiente, essa água era posteriormente drenada para fora da sala de ensaio enquanto que o desumidificador devolvia ar seco para o ambiente como mostra a Figura 3.58(b).

O controle da temperatura e da umidade relativa era realizado visualmente por meio de um termo higrômetro como apresenta a Figura 3.59 e de acordo com a caracterização da umidade relativa e da temperatura da região estudada, na sala climatizada os valores variavam entre (30 - 62%), umidade relativa, e de (24,2 - 32,8°C), temperatura.

Figura 3.59: Termo higrômetro utilizado no monitoramento da umidade relativa e da temperatura na sala climatizada.



# Capítulo 4

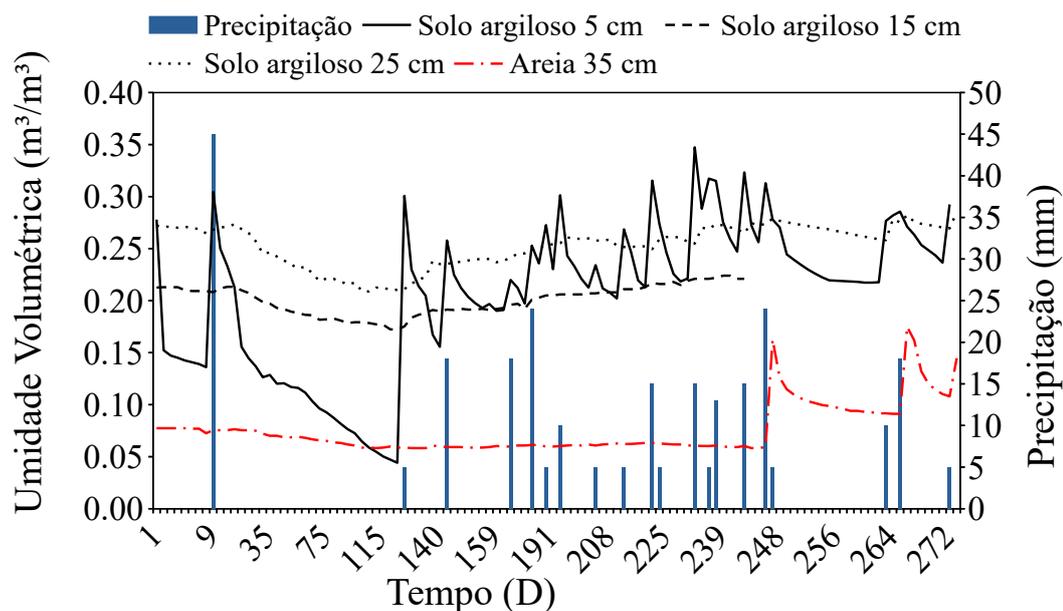
## Resultados e análises

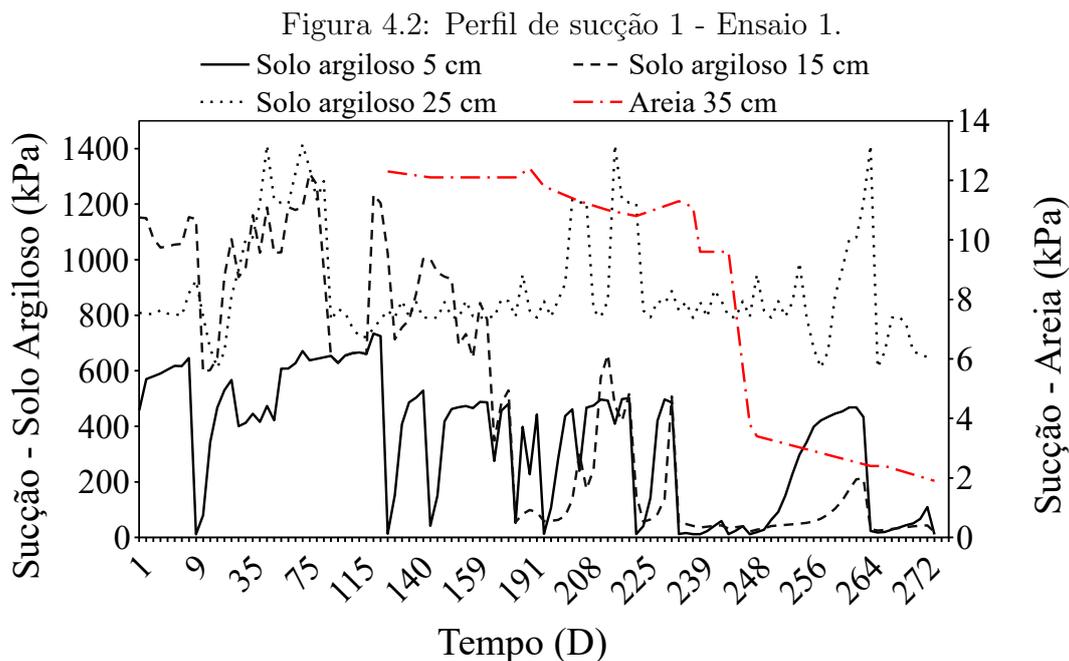
São apresentados e discutidos os resultados dos dois experimentos realizados avaliando o desempenho da barreira capilar sob o controle das condições pluviométricas e de radiação, e o desempenho da barreira resistiva sob o controle das variáveis supracitadas e também da temperatura e umidade relativa.

### 4.1 Primeiro ensaio

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam as leituras realizadas pelos sensores de umidade FDR's e pelos tensiômetros instalados nas diferentes profundidades da barreira capilar (profundidades 5 cm, 15 cm e 25 cm em solo argiloso e profundidade de 35 cm na areia de duna) no perfil 1 (Figura 4.3).

Figura 4.1: Perfil de umidade 1 - Ensaio 1.





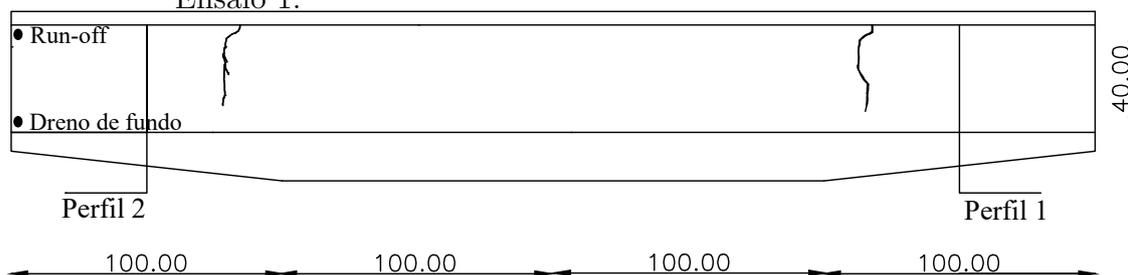
É possível visualizar, conforme esperado, uma atividade mais intensa nos pontos de monitoramento localizados mais externamente à barreira e um funcionamento adequado da resposta dos tensiômetros/sensores de umidade quando da falha da barreira capilar (indicada nesse perfil pelo súbito aumento da umidade na profundidade de 35 cm, no sensor localizado na camada de areia, próximo ao dia 248 de ensaio). Os dados que embasaram a criação das Figuras 4.1 e 4.2 são apresentados no Apêndice B desta tese.

Para o caso das medidas de sucção, a partir do dia 164, as medidas efetuadas pelo tensiômetro localizado a 15 cm de profundidade sofreram acentuada redução, passando a equivaler às leituras do tensiômetros localizado a 5cm de profundidade. Esta mudança não foi contudo captada pelo sensor de umidade localizado na mesma profundidade, durante o período em que o mesmo permaneceu ativo. Ambos os sensores de sucção e umidade instalados a 25cm de profundidade (base da camada de argila) não apresentaram mudanças em seu comportamento até a finalização dos ensaios. Isto ocorreu provavelmente pelo fato de que a ruptura da barreira hidráulica se dá em pontos específicos, sendo a água transportada pelas trincas formadas durante os períodos de estiagem, não necessariamente afetando as leituras efetuadas pelos tensiômetros instalados na camada superior de argila. Para o caso dos tensiômetros e medidores de umidade instalados na camada de areia, devido ao fluxo provocado pela inclinação do canal, estes são sensíveis às infiltrações decorrentes de falha na barreira localizadas à montante do ponto de monitoramento, diferentemente do que ocorre na camada de argila.

A Figura 4.3 apresenta a localização dos perfis de sucção e de umidade em relação a ocorrência das principais fissuras com o intuito de ajudar nas discussões dos resultados. Nessa figura também estão indicadas a localização dos drenos do escoamento superficial (run-off) e dos drenos de fundo.

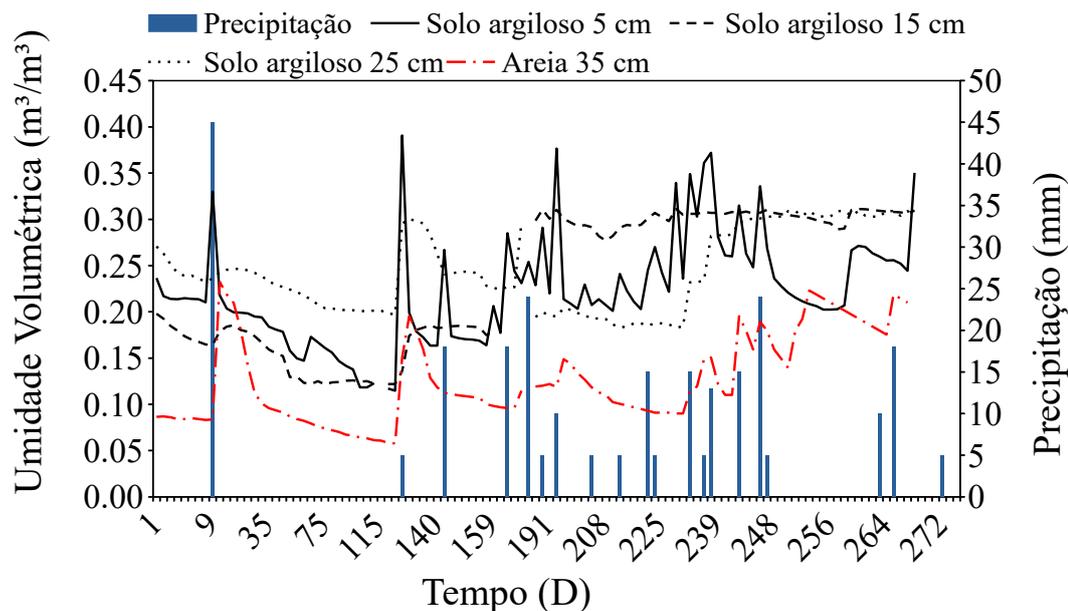
O monitoramento dos valores de umidade do solo no perfil 2, apresentado na Figura 4.4 mostra que a barreira hidráulica sofreu falhas, permitindo a passagem de água para a ca-

Figura 4.3: Localização das fissuras em relação aos perfis de sucção e umidade - Ensaio 1.



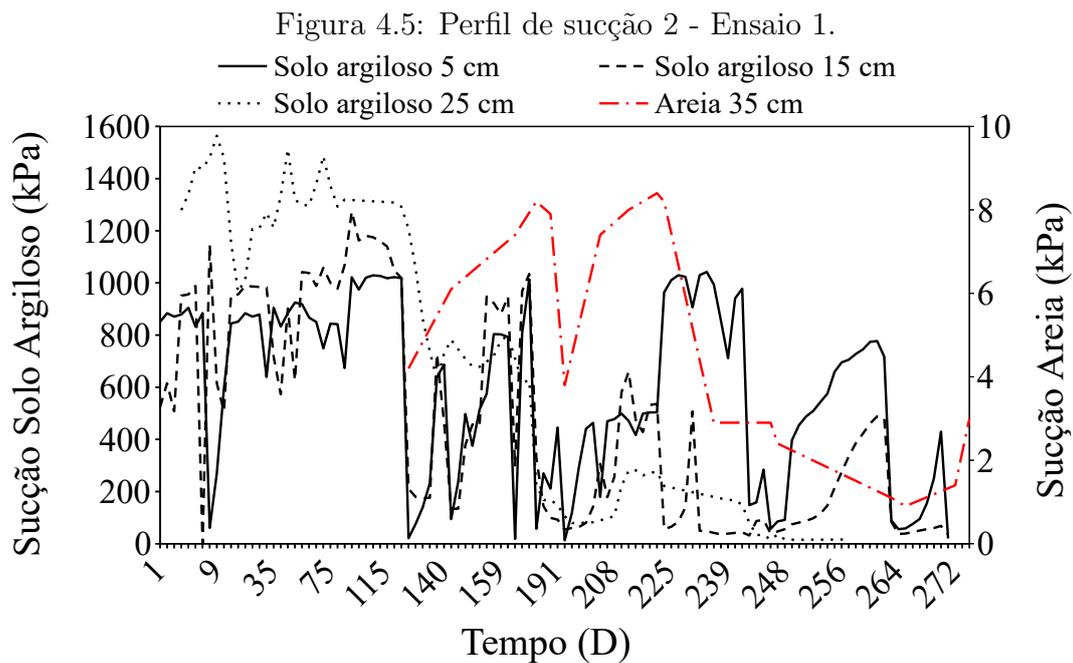
mada de areia, já a partir do dia 9 (dias 9, 127, 184, 203, 238, 243, 246 e 265). A partir do dia 127 as sondas de umidade localizadas nas profundidades de 15cm e 25cm também apresentaram variações em seus valores de umidade, os quais possuem reflexos nos valores de sucção medidos e apresentados na Figura 4.5. De uma forma geral, os valores de sucção apresentados na Figura 4.5 concordam com as ocorrências de avanço de umidade apresentadas na Figura 4.4. É possível notar as respostas do tensiômetro instalado nas camadas de areia e de argila seguindo o comportamento esperado durante todo o experimento.

Figura 4.4: Perfil de umidade 2 - Ensaio 1.

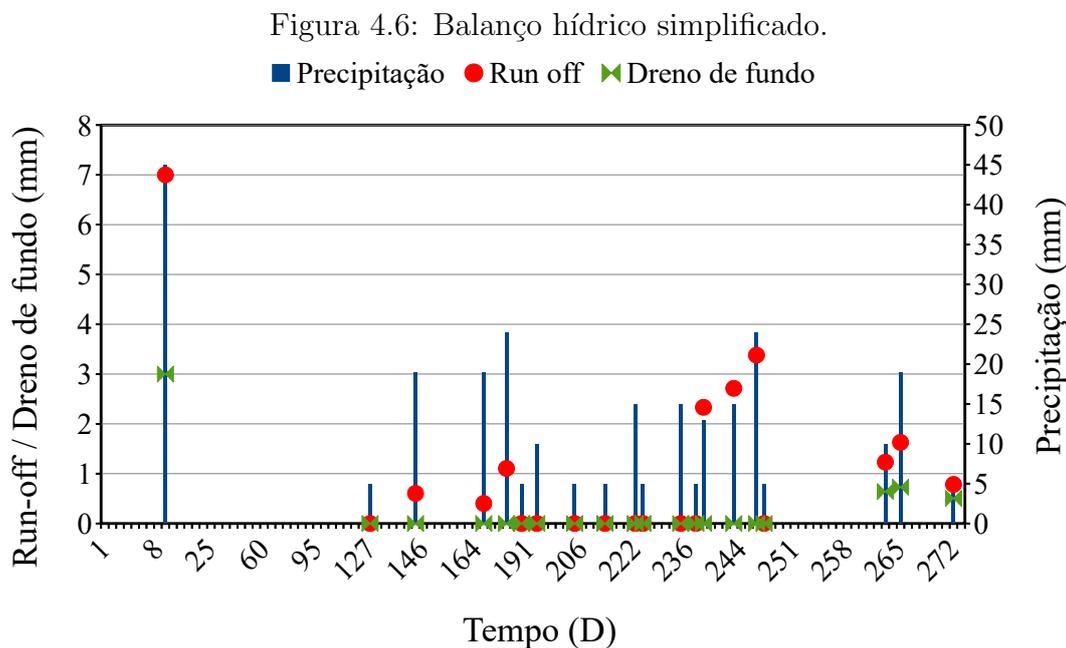


A Figura 4.6 apresenta um balanço hídrico simplificado do ensaio 1, indicando os volumes precipitados, bem como volumes coletados pelos drenos superficiais e de fundo. Os dados apresentados mostram que precipitações baixas (5 e 10 mm) quando ocorridas em um momento de baixo teor de umidade do solo como nos dias 127, 188, 193, 203, 215, 222, 235, 237, 238, não provocam escoamento superficial ou drenagem pela base da barreira capilar. Por outro lado, é possível observar que chuvas superiores à 15 mm tendem a provocar maior escoamento superficial, comportamento esperado para um solo de baixa condutividade hidráulica como o regolito.

A Figura 4.6 mostra também que apesar das muitas falhas indicadas pelos sensores de sucção e de umidade da camada de areia (Figuras 4.4 e 4.5), as coletas realizadas no



dreno de fundo foram muito pequenas em comparação ao volume precipitado e escoado superficialmente.



A Figura 4.7 apresenta as ocorrências de fissuras no primeiro ensaio. Essas fissuras não apresentaram um grande espaçamento, mantiveram-se sempre com uma abertura inferior à 3 mm, limitaram-se à profundidade do horizonte do solo argiloso e cicatrizaram quase que em sua totalidade à medida que chuvas de baixa intensidade incidiam sobre elas.

Figura 4.7: Fissuras mais relevantes ocorridas no primeiro ensaio.



(a) Fissura situada na parte mais elevada do canal.



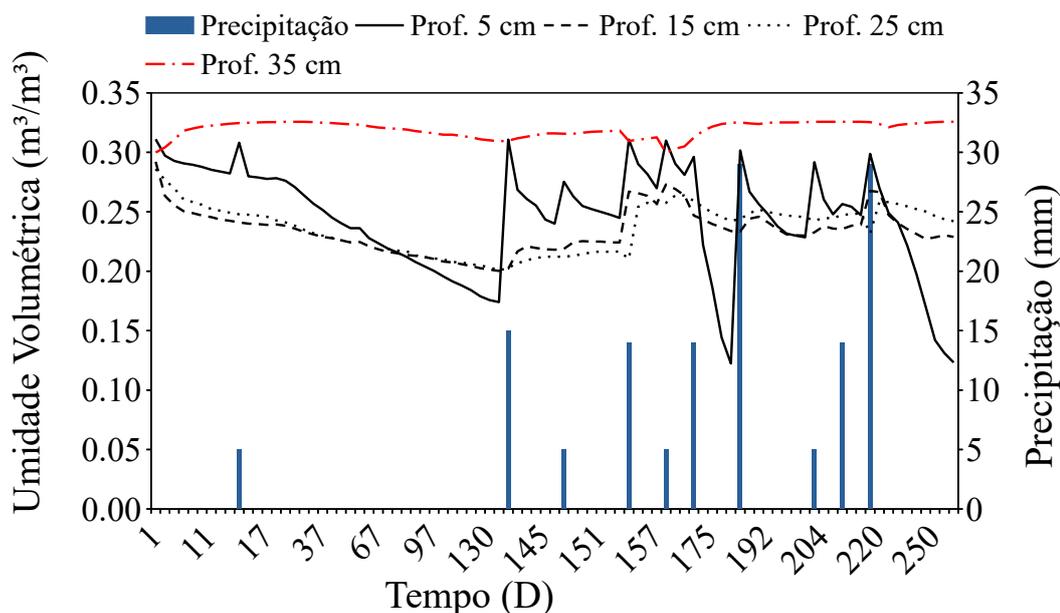
(b) Fissura situada no fim do canal, na parte mais próxima ao dreno.

## 4.2 Segundo ensaio

A Figura 4.8 apresenta as leituras realizadas pelos FDRs no perfil 1 de umidade do segundo ensaio simulando a barreira resistiva. Neste perfil pode-se notar as intensas variações sofridas pelos sensores instalados na profundidade mais rasa do perfil de solo argiloso à 5 cm. Conforme esperado, as variações de umidade se mostraram mais sutis com o aumento da profundidade, de forma que o sensor instalado no horizonte mais profundo à 35 cm da barreira resistiva se manteve praticamente estável na umidade de compactação, não indicando a ocorrência de vazamentos para os drenos de fundo.

Nas profundidades rasa e intermediárias, representadas pelos sensores de 5, 15, e 25 cm, foi observado um comportamento curioso no início do ensaio, que aparenta ser uma espécie de migração da umidade destas camadas a camada mais profunda, representada pelo sensor de umidade instalado a 35 cm. Este movimento pode ser percebido nos primeiros dias do ensaio (entre os dias 1 e 11). Enquanto os sensores das camadas rasa intermediárias registraram um discreto decaimento nos valores de umidade, a camada mais profunda de 35 cm registrou um pequeno aumento no seu valor de umidade. Após isto as medidas do FDR instalado na camada de 35 cm se mantiveram constantes, enquanto que os FDRs das camadas de 15 e 25 cm começaram a responder, ainda que de maneira discreta, aos estímulos externos (radiação, temperatura, chuva e umidade relativa) ao longo do ensaio.

Figura 4.8: Perfil de umidade 1 - Ensaio 2.

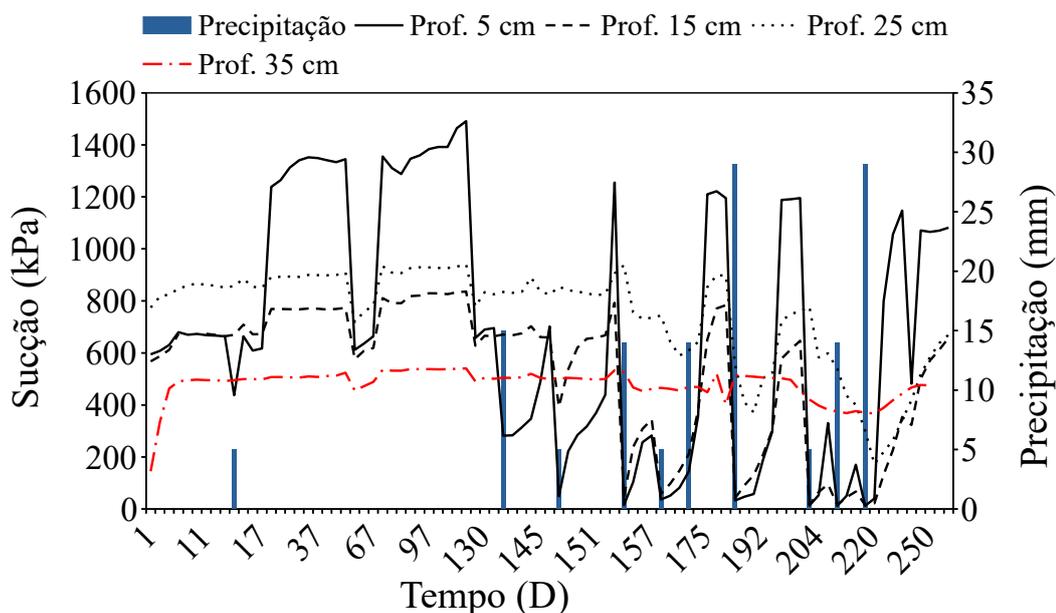


O perfil de sucção 1, apresentado na Figura 4.9 mostra as leituras realizadas pelos tensiômetros ao longo do segundo ensaio. Novamente o tensiômetro instalado na camada de 5 cm apresentou uma maior atividade, registrando os maiores e menores valores de sucção em relação às demais profundidades. De uma maneira geral há concordância entre as leituras de umidade e sucção, ou seja, o aumento na umidade gerando a redução da sucção ao longo do perfil 1. Nota-se nesse gráfico que os tensiômetros localizados nas profundidades mais rasas da barreira (5 e 15 cm) começaram a responder de maneira muito similar desde o evento pluviométrico do dia 154. Enquanto que o tensiômetro da camada de 25 cm começou a apresentar maior atividade a partir do dia 165, com o aumento dos eventos pluviométricos.

Entre os dias 57 e 67 todos os tensiômetros das camadas de 5, 15, 25 e 35 cm sofreram uma redução de sucção, o valor da camada externa sofreu a maior variação, saindo de 1345 kPa no dia 56 e apresentando uma sucção de 612 kPa no dia 57 e no fim desse período, no dia 67 apresentava uma sucção de 636 kPa e no dia seguinte, 68, apresentou uma sucção de 1355 kPa. Não ocorreu precipitação alguma nesse período e esse comportamento se repete em outras duas ocasiões no dia 130, com todos os tensiômetros novamente e no dia 240 apenas com o tensiômetro da camada de 5 cm. Este evento pode estar relacionado a algum mal funcionamento do desumidificador, associado a uma proximidade maior das sondas de sucção das fraturas observadas durante o ensaio. Em tais situações, haveria um aumento da umidade relativa da sala, diminuindo os valores de sucção e aumentando os valores de umidade do solo nos pontos de leitura situados mais proximamente às superfícies expostas à atmosfera. Ressalta-se também que, conforme indicado na Figura 3.17, pequenas variações de umidade no intervalo de umidade volumétrica  $0,15 \leq \theta \leq 0,25$  podem induzir a grandes variações de sucção no solo.

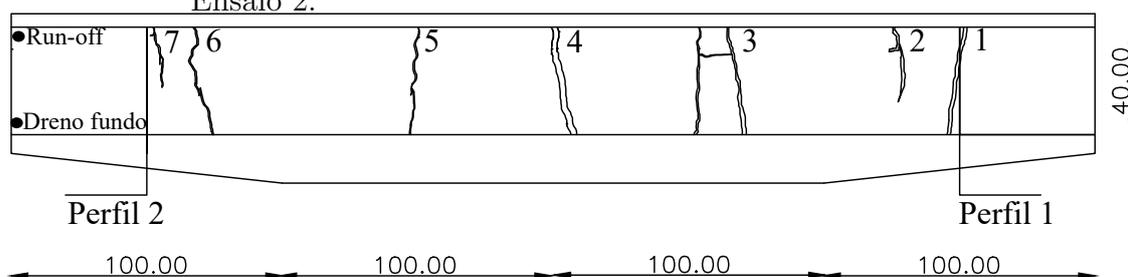
O tensiômetro da camada de 35 cm apresentou discretas variações ao longo do ensaio e começou a indicar redução no valor de sucção (de 420 kPa para 360 kPa) a partir da precipitação ocorrida no dia 203, no entanto, nenhum aumento significativo de umidade foi registrado pelo FDR instalado na mesma camada.

Figura 4.9: Perfil de sucção 1 - Ensaio 2.



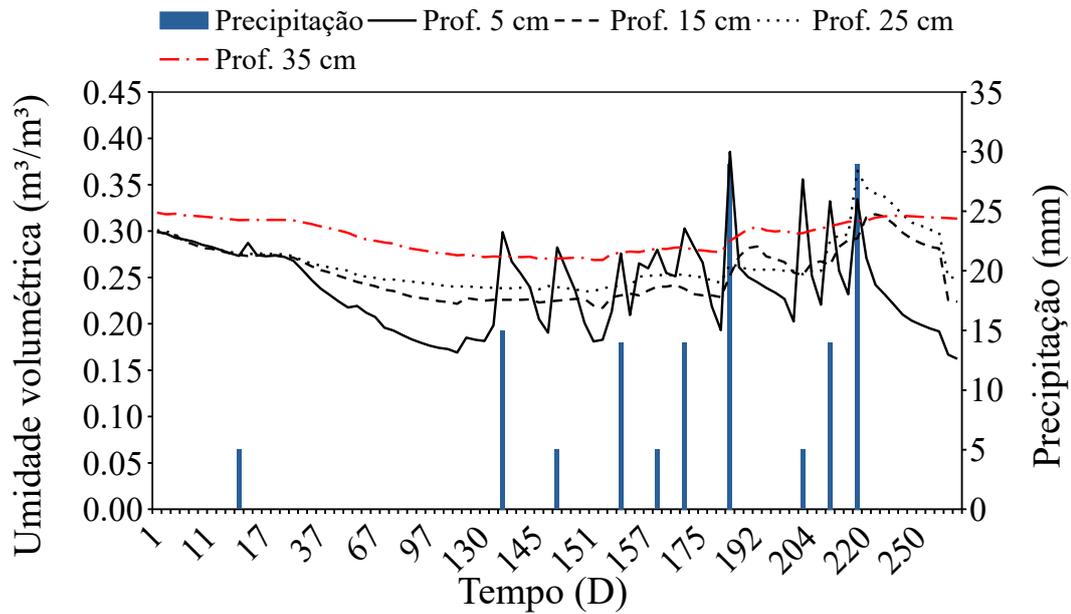
Com o mesmo intuito da Figura 4.3 a Figura 4.10 apresenta a localização dos perfis em relação a ocorrência das principais fissuras no segundo ensaio. Diferente do primeiro ensaio as fissuras se apresentaram em maior número e com dimensões muito superiores aquelas vistas no primeiro ensaio, devido a isso a Figura 4.10 apresenta também um sistema simples de identificação das fissuras para que as características de cada uma delas possa ser melhor discutida a seguir.

Figura 4.10: Localização das fissuras em relação aos perfis de sucção e umidade - Ensaio 2.



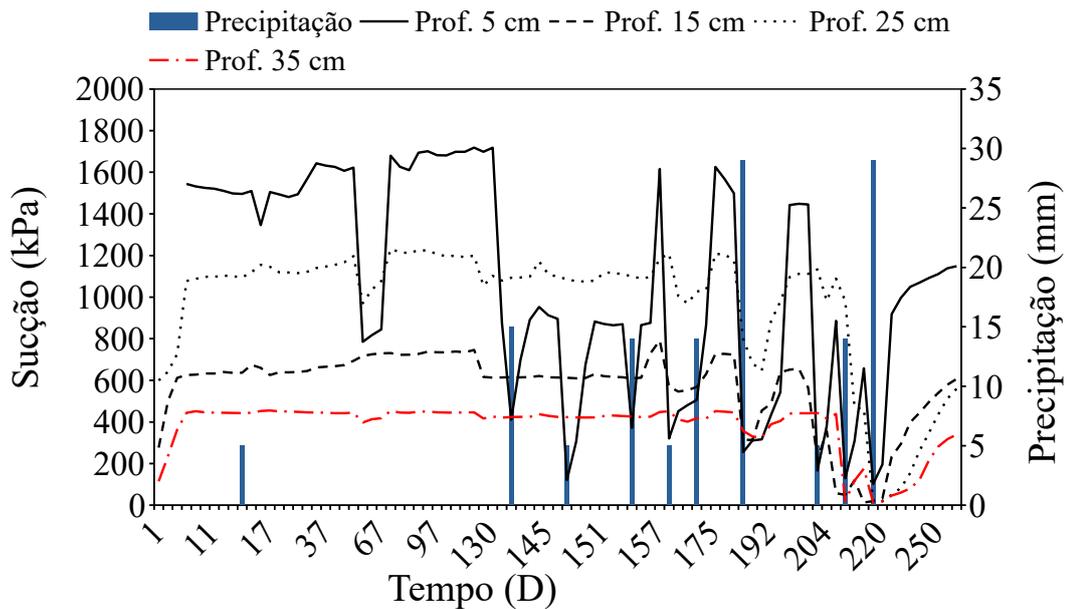
A Figura 4.11 apresenta o perfil 2 de umidade com as suas respectivas leituras realizadas pelos FDRs. Neste perfil o instrumento instalado na camada de 5 cm mostrou-se mais ativo que os demais, enquanto que as leituras realizadas pelos instrumentos instalados nas camadas de 15 e 25 cm mantiveram-se muito próximos dos seus valores iniciais do ensaio, o aumento da umidade nesses sensores começaram a aumentar a partir do evento pluviométrico do dia 189. Diferente dos sensores de umidades, os tensiômetros instalados nas camadas de 15 e 25 cm indicaram uma maior variação nos seus valores de sucção medidos desde o evento pluviométrico do dia 154, como pode ser visualizado na Figura 4.12. Acredita-se que tal variação é justificada pelo avanço da frente de umidificação até este ponto seguido de posterior secagem.

Figura 4.11: Perfil de umidade 2 - Ensaio 2.



A Figura 4.12 apresenta o perfil de sucção 2 e nele pode-se observar o mesmo ocorrido no perfil de sucção 1 entre os dias 57 e 67, com a diferença que nesta localidade do perfil apenas os tensiômetros das camadas de 5 e 15 cm apresentaram redução nos seus valores de sucção sem ocorrência de precipitação. De uma maneira geral as respostas aos eventos pluviométricos por parte dos sensores de umidade e de sucção se mostraram coerentes embora apenas os tensiômetros tenham indicado a falha da barreira nos dias 206 e 209, tais falhas podem ser averiguadas no gráfico quando os valores de sucção apresentados no Figura 4.12 se aproximam muito de zero nos referidos dias.

Figura 4.12: Perfil de sucção 2 - Ensaio 2.



Infelizmente nesse segundo ensaio o simulador de chuva sofreu uma obstrução devido ao

derretimento da parafina que suportava as agulhas e sua utilização foi comprometida desde o dia 18/03 (dia 189 no gráfico) e por isso o calendário de chuva não pôde ser cumprido.

Antes da apresentação do balanço hídrico realizado para o ensaio 2, faz-se necessária a apresentação das fissuras ocorridas neste ensaio devido a grande influência que elas exerceram na performance da barreira resistiva. Conforme a numeração exibida nas fissuras apresentadas na Figura 4.10 a evolução das fissuras será apresentada nas figuras a seguir.

A Figura 4.13 apresenta a ocorrência e a evolução das fissuras 1 e 2 entre o sexto e o décimo quinto dia de ensaio. No sexto dia de ensaio a fissura 2 ainda não tinha se apresentado e a fissura de número 1 ainda apresentava uma espessura inferior a 3 mm. Com o passar do tempo foi notado o aparecimento da fissura 2 e o aumento expressivo das dimensões da fissura 1, apresentando uma espessura mínima de 4 mm nas camadas superficiais da barreira e atingindo 11 mm nos horizontes mais profundos.

Figura 4.13: Fissuras 1 e 2 - Período do dia 6 ao dia 15.



(a) Estado das fissuras 1 e 2 no sexto dia de ensaio.



(b) Estado das fissuras 1 e 2 no décimo quinto dia de ensaio.

A fissura 3 apresentada na Figura 4.14 estava situada à uma distância de 1,5 m da parte mais elevada da barreira e começou apresentando uma espessura de 2mm alcançando dimensões que variavam de 8 a 10 mm com o passar do tempo.

Figura 4.14: Fissura 3 - Período do dia 6 ao dia 15.



(a) Estado das fissuras 3 no sexto dia de ensaio.



(b) Estado das fissuras 3 no décimo quinto dia de ensaio.

A fissura de número 5 apresentada na Figura 4.15 foi uma das maiores fissuras registradas ao longo do ensaio, atingindo uma espessura de separação dos blocos da barreira de 12 mm foi um dos principais pontos responsáveis pela falha da barreira resistiva.

Figura 4.15: Fissura 5 - Período do dia 6 ao dia 15.



(a) Estado das fissura 5 no sexto dia de ensaio.



(b) Estado das fissura 5 no décimo quinto dia de ensaio.

As fissuras 6 e 7 localizadas mais próximas dos coletores de run-off e dreno de fundo são apresentadas na Figura 4.16. A fissura 6 mostrou-se discreta até a profundidade de 25 cm, no entanto a sua espessura aumentou bastante com a profundidade atingindo uma separação

de 15 mm.

Figura 4.16: Fissura 5 - Período do dia 6 ao dia 15.



(a) Estado das fissuras 6 e 7 no sexto dia de ensaio.

(b) Estado das fissura 6 e 7 no décimo quinto dia de ensaio.

A fissura 4 apresentada na Figura 4.10 não pode ter sua imagem registrada por que estava escondida atrás de um dos paramentos de metal do canal. Seu cadastro, localização e espessura, foi realizado após o evento pluviométrico do dia 184 quando foi notado a infiltração de água em seu interior. A Figura 4.17 apresenta uma pequena parte que ficou aparente após o evento pluviométrico supracitado. Essa fissura estava situada a exatos 2 m de distância dos drenos, ou seja, bem no meio do canal e apresentou uma espessura quando identificada de 17 mm, foi a maior fissura identificada nesse ensaio.

O balanço hídrico da barreira resistiva é apresentado na Figura 4.18 e por meio desta figura é possível perceber que a barreira não apresentou coleta de água superficial em nenhum evento pluviométrico. No dia 136, três chuvas de 5 mm foram simuladas e devido a baixa intensidade todo o volume precipitado foi absorvido pelo solo. Nos dias 154 e 165 precipitações de 14 mm foram realizadas e ainda assim não geraram nenhuma coleta, nem pelos drenos do fundo, nem pelo coletor de águas superficiais.

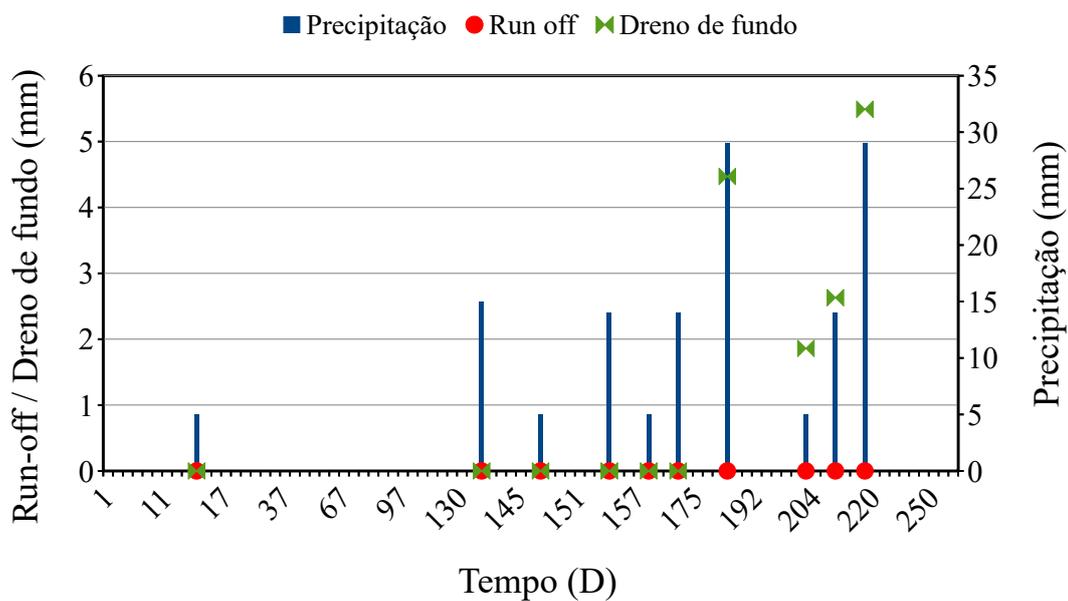
A partir do dia 184 a barreira começou a apresentar coletas pelo dreno de fundo que não foram detectados pelos instrumentos dispostos ao longo dos perfis apresentados na Figura 4.10. Em comparação com a barreira capilar, que teve seus instrumentos acionados mas não teve os seus drenos solicitados, a barreira resistiva mostrou um desempenho inferior, levando-se ainda em consideração que esse ensaio foi comprometido devido à obstrução ocorrida no simulador de chuva, fato que impediu a ocorrência da simulação de mais eventos pluviométricos.

Na Figura 4.18 é possível observar ainda que devido às fissuras e suas magnitudes, pouca

Figura 4.17: Apresentação de parte notada da fissura 4.



Figura 4.18: Balanço hídrico simplificado - Ensaio 2.



água escoou superficialmente, é possível notar também que após uma precipitação de maior intensidade, 29 mm (24mm +5mm) que ocorreu no dia 184, uma precipitação de baixa intensidade, 5 mm, conduziu à coleta de quase 50% do volume precipitado. Sobre este fato parte-se da hipótese de que a chuva anterior aumentou significativamente a saturação da barreira aumentando assim a sua permeabilidade.

# Capítulo 5

## Conclusão

### 5.1 Conclusão geral

O presente trabalho apresentou a utilização de um canal de fluxo 2d utilizado no monitoramento de soluções de diferentes camadas finais de aterro expostas à condições intempéricas controladas em laboratório. O canal de fluxo e a sala climatizada mostraram um bom desempenho e um bom potencial para o desenvolvimento de futuras pesquisas. A seguir serão apresentadas algumas conclusões referentes às partes do projeto que conduziram ao produto final do trabalho.

#### 5.1.1 Adaptação do canal hidráulico como canal de fluxo

O canal utilizado nessa pesquisa foi reaproveitado (a partir do condicionamento e adaptação de um antigo canal hidráulico) como já citado no capítulo três. A primeira etapa, a etapa de requalificação do canal foi um pouco árdua, devido à idade do canal, superior à 30 anos, e às condições que ele se encontrava devido à longa exposição às intempéries. Concomitantemente ao processo de requalificação e adaptação do canal uma solução de simulador de chuva que atendesse às condições do canal fez-se necessária e baseado no comprimento e na largura do canal foi que surgiu a ideia da calha com extensão de 4m e base de 0,15 m, como solução de simulador de chuva. Tendo o simulador de chuva partiu-se para o teste de estanqueidade e calibração do simulador de chuva.

As dimensões do canal ofereceram uma vantagem e um prejuízo. No que diz respeito à análise da capacidade de desvio das barreiras hidráulicas, fator que dependia de uma longa extensão como a do referido canal, foi excelente, pois, foi possível notar que as instrumentações FDRs e tensiômetros situados nos pontos mais baixos das barreiras (mais próximos dos drenos) indicaram leituras de umidade mais elevadas e conseqüentemente leituras de sucções menores, em relação aos instrumentos situados no lado mais elevado da barreira e conseqüentemente mais afastados dos drenos. Cabe ressaltar que mesmo diante da baixa permeabilidade imposta pela camada do solo fino (regolito) utilizado nessa pesquisa foi possível notar esse fenômeno.

Por outro lado, do ponto de vista de montagem e preparação dos experimentos, a grande extensão do canal induziu a volumes altos de solos a serem preparados. Considerando-se os dois ensaios realizados, o tempo investido em atividades como secagem, destorroamento do solo, homogeneização na umidade ótima e a compactação no canal, alcançou em média 2 meses. Sendo assim, a grande extensão do canal gerou uma alta demanda física e temporal.

### **5.1.2 Simulador de chuva**

O desempenho do simulador de chuva se mostrou bastante satisfatório. O custo para construção foi baixo e sua montagem e adaptação mostrou-se bastante flexível. Um dos problemas que cabem ser expostos foi o tempo da confecção do mesmo, como se tratou de um sistema com a inserção de 1500 agulhas hipodérmicas, a sua construção foi lenta e exigiu paciência. Ao final da inserção das agulhas foi ainda necessário o teste de estanqueidade, garantindo que toda e qualquer água passasse somente pelas agulhas. Essa solução apenas foi alcançada com a vedação da parte inferior das agulhas com uma mistura de resina e micro esferas de vidro.

Por se tratar de um processo longo, como justificado no parágrafo acima, e por não ser o objetivo final dessa tese, foi necessário ajustar, limitar a altura da lâmina d'água, ao objetivo planejado para o simulador. A teoria que embasa essa discussão é a de que a densidade das agulhas provocou essa limitação da lâmina d'água, ficando desde já como sugestão para projetos futuros, o estudo da densidade das agulhas e a resposta da intensidade pluviométrica.

### **5.1.3 Simulador solar**

A construção do simulador solar dessa pesquisa pode ter marcado, com toda a modéstia e humildade, um divisor de águas nos trabalhos envolvendo a utilização de simuladores solares na engenharia civil e geotécnica. Para desenvolver este simulador, pesquisas foram realizadas buscando trabalhos que anteriormente pretendiam simular a radiação solar em superfícies ou no solo. Muitos trabalhos encontrados não tinham o embasamento necessário para justificar a utilização de uma determinada lâmpada como fonte de radiação. Graças a interdisciplinaridade desse trabalho foi possível contar com a presença e orientações de físicos especializados em microclima (LabMin - Laboratório de Microclima e Modelagem) e óptica (LaPO - Laboratório de Propriedades Ópticas).

A partir daí as lâmpadas de vapor metálico foram as mais adequadas para o desenvolvimento do simulador solar utilizado nessa pesquisa.

O conjunto lampadas, reatores, refletores, apresentou um excelente custo benefício pois suportou 2 anos de funcionamento sem que a troca fosse necessária, ainda que exposto a interrupções abruptas no fornecimento de energia elétrica na edificação onde estava sendo utilizado.

O desempenho do simulador foi excelente, a sua configuração e montagem foi muito prática e de baixíssima complexidade. Baseado nisso espera-se que esse trabalho sirva como

referência para futuras pesquisas que pretendam utilizar as lâmpadas de fluxo de vapor metálico como fonte de radiação para o desenvolvimento de futuros simuladores solares.

#### **5.1.4 Controles da temperatura e da umidade relativa**

O controle da umidade relativa e da temperatura se mostrou bastante eficaz. Para tanto, como descrito em capítulos anteriores, o desumidificador e o condicionador de ar foram os responsáveis por esse controle. Considerando que o nível de umidade relativa praticada na cidade de Salvador está bastante distinta daquela vivida no semi-árido foi possível perceber a relevância da umidade relativa na resposta da barreira resistiva.

A utilização do desumidificador não foi complexa e considerando a pequena área (8,8  $m^2$ ) construída para a acomodação do canal, o desempenho do desumidificador e consequentemente da sala climatizada foram muito bons.

#### **5.1.5 Respostas das instrumentações**

A intenção do trabalho era a de obter quatro perfis ao longo do canal, no entanto, por insuficiência de dados, coincidentemente, nos perfis intermediários da barreira, isso não foi possível. Há um problema muito grande na conexão da saída do cabo estéreo dos equipamentos e a conexão com o data logger. Ciente dessa dificuldade com o contato entre os instrumentos e os aquisitores de dados, coletas semanais eram realizadas sendo muito positivas para a aquisição de dados dos perfis situados nos extremos da barreira e não surtindo efeito nos perfis intermediários. Uma possível solução para melhorar esse problema associado ao contato entre os instrumentos e o data logger é desprezar a conexão via cabo estéreo e tentar adaptar ligações diretas entre os fios de um aparelho com o outro.

Uma adequação realizada nos data logger foi com relação às baterias, optou-se no segundo ensaio pela utilização do data logger ligado direto na alimentação e isso conduziu à uma melhor qualidade nos dados obtidos.

#### **5.1.6 Comparação entre as diferentes configurações de barreiras**

As barreiras foram solicitadas em condições climáticas diferentes e por isso ponderações devem ser realizadas no juízo do desempenho. Como visto a performance da barreira resistiva foi comprometida devido a ocorrência das muitas fissuras ao longo do experimento. Acredita-se que tal grau de fissuramento da barreira foi alcançado devido ao controle da umidade relativa, segundo os valores esperados para uma simulação no semi-árido nordestino. No que diz respeito à performance da barreira capilar, que estava exposta à umidade relativa da cidade de Salvador no primeiro ensaio, cabe a avaliação frente à exposição às temperatura e umidade relativa do semi-árido em um futuro próximo. Considerando somente a análise dos dados obtidos o desempenho da barreira capilar foi muito bom, mostrando-se bastante resiliente, indicando um baixo volume percolado até os drenos de fundo da barreira.

### 5.1.7 Sugestões para pesquisas futuras

Como sugestões para trabalhos futuros ficam as seguintes propostas:

Pesquisas relacionadas a utilização de geossintéticos como uma possível solução para oferecer o contraste hidráulico numa solução de camada final de aterro utilizando o princípio das barreiras hidráulicas.

Ainda na linha da aplicação de geossintéticos em barreiras capilares recomenda-se a utilização de diferentes configurações de barreiras hidráulicas a partir da inserção dos geotêxteis em diferentes profundidades da barreira.

Utilização de diferentes solos, com diferentes níveis de contrastes hidráulicos como solução em camadas finais de aterro.

Avaliação da evolução das fissuras para alimentar modelos de ocorrências de fissuras e de como as chuvas de baixa intensidade colaboram para o controle dessas fissuras e como esses eventos pluviométricos colaboram na recuperação dessas fissuras.

Avaliar diferentes soluções de camadas finais de aterro mediante à simulação para regiões de clima predominante úmido. Esta pesquisa teria como intuito atender à uma demanda pela adoção de soluções sanitárias adequadas em áreas da região norte do país e carentes de solução adequada para os RSU.

Recomenda-se ainda um estudo de campo acompanhando uma barreira capilar em escala real e a avaliação dos benefícios e, talvez, malefícios advindos de sua instalação em uma região do semiárido. A literatura indica uma boa adequação dessa solução ao clima, no entanto, é interessante entender como as fissuras podem comprometer o funcionamento da camada final em uma escala real.

À respeito da aplicação do simulador de chuva empregado nessa tese, sugere-se ainda o estudo de diferentes densidades das agulhas e as suas consequências na intensidade das chuvas. Acredita-se que uma menor densidade de agulhas conduza à um controle mais confortável do simulador, devido ao trabalho sob alturas mais elevadas da lâmina d'água.

# Referências Bibliográficas

- ABDOLAHZADEH, A. M.; VACHON, B. L.; CABRAL, A. R. Evaluation of the effectiveness of a cover with capillary barrier effect to control percolation into a waste disposal facility. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 48, p. 996–1009, 2011. ISSN 00083674.
- ABNT. *NBR 6458 Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. 1984. 6 p.
- ABNT. *NBR 6459 Determinação do limite de liquidez*. 1984. 6 p.
- ABNT. *NBR 7180 - Determinação do limite de plasticidade*. 1984. 3 p.
- ABNT. *NBR 7181 - Analise Granulometrica*. 1984. 13 p.
- ABNT. *NBR 6457 Preparacao para ensaios de compactacao e ensaios de caracterização*. 1986. 9 p.
- ABNT. *NBR 12004 Determinação do índice de vazios máximo de solos não-coesivos*. 1990. 7 p.
- ABNT. *NBR 12051 Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos*. 1991. 14 p.
- ABNT. *NBR 13292 Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante*. 1995. 8 p.
- ABNT. *NBR 13896- Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, construção e operação*. 1997. 12 p.
- ABNT. *NBR 14545 Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*. 2000. 12 p.
- ABNT. *NBR 7182 Ensaio de compactação*. 2016. 9 p.
- ALLEN, R. G. et al. Guidelines for computing crop water requirements-fao irrigation and drainage paper 56. *Crop Evapotranspiration*, p. 1–15, 1998. ISSN 02545284.
- ALMEIDA, J. R. *Estudo do comportamento de barreira capilar em aterros de resíduos*. [S.l.]: Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, 2011. 175 p.

ALMEIDA, M. S. de S. *Estudo da resistência ao cisalhamento de um solo não saturado quando percolado por fluidos de diferentes constantes dielétricas*. [S.l.]: Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Programa de Pós Graduação em Energia e Ambiente, 2016. 229 p.

ANUNCIÃO, L. G. *Desenvolvimento de um equipamento para avaliação da compressibilidade, K<sub>0</sub> e produção de biogás em RSU*. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Programa de pós graduação em Engenharia Civil, 2019. -174 p.

AUBERTIN, M. et al. Analyses of water diversion along inclined covers with capillary barrier effects. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 46, p. 1146–1164, 10 2009. ISSN 0008-3674. Disponível em: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/T09-050>.

AVILA, R. A. G. *Estudo da eficácia da adição de carvão aditivado na performance de barreiras minerais compactadas para contenção de hidrocarbonetos*. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana, 2017.

BENSON, C. et al. Evaluation of final cover performance: field data from the alternative cover assesment program (acap). *Waste Management Conference*, p. 18, 2002.

BICALHO, K. V.; MACHADO, S. L.; GERSCOVICH, D. M. S. *Condutividade hidráulica e fluxo em solos não saturados*. 2015. 297-326 p.

BONAPARTE, R.; DANIEL, D. E.; KOERNER, R. M. *Assessment and Recommendations for Improving the Performance of Waste Containment Systems*. 2002. 1-1039 p.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. *Hydraulic proprieties for porous media*. 1964. 25 p.

BULUT, R.; LYTTON, R. L.; WRAY, W. K. Soil suction measurements by filter paper. In: . American Society of Civil Engineers, 2001. p. 243–261. ISBN 9780784405925. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/40592%28270%2914>.

BURDINE, N. Relative permeability calculations from pore size distribution data. *Journal of Petroleum Technology*, Society of Petroleum Engineers (SPE), v. 5, p. 71–78, 3 1953. ISSN 0149-2136.

CAPACCIONI, B. et al. Effects of a temporary hdpe cover on landfill gas emissions: Multiyear evaluation with the static chamber approach at an italian landfill. *Waste Management*, Elsevier Ltd, v. 31, p. 956–965, 2011. ISSN 0956053X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.004>.

CARDOSO, L. da S. P. *Desenvolvimento de um equipamento para o estudo do transporte de poluentes automotivos em solos não saturados*. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana, 2006. 99 p.

CARDOSO, L. da S. P. *Estudo do Transporte de poluentes imiscíveis em solos*. [S.l.]: Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Programa de Pós Graduação em Energia e Ambiente, 2011. 149 p.

- CATAPRETA, C. A. A. *Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação*. 316 p., 2008.
- CERQUEIRA, R. de C. V. *Avaliação do fluxo bidimensional de óleo diesel em solo não saturado da formação Barreiras*. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana, 2016. 204 p.
- CHILDS, E. C.; COLLIS-GEORGE, N. The permeability of porous materials. *Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.*, The Royal Society, v. 201, p. 392–405, 1950. ISSN 2053-9169.
- COREY, A. T. The interrelation between gas and oil relative permeabilities. *Producers Monthly*, v. 19, p. 38–41, 1954.
- COSTA, C. D. M. C. *Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Programa de Pós Graduação em Geotecnia, 2015. 163 p. Disponível em: <http://www.geotecnia.unb.br/downloads/teses/108-2015.pdf>.
- CUI, Y. J. et al. Field simulation of in situ water content and temperature changes due to ground–atmospheric interactions. *Géotechnique*, v. 55, p. 557–567, 2005. ISSN 0016-8505. Disponível em: <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geot.2005.55.7.557>.
- DAMASCENO, L. A. G. *Emissão fugitiva de metano através do sistema de cobertura de um aterro sanitário considerando a ocorrência de zonas com fissuramento*. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Programa de pós graduação em Engenharia Civil, 2018. 179 p.
- DEVICES, D. *Dielectric Water Potential Sensors - Manual*. 2016.
- DEVICES, I. D. *Dewpoint PotentiaMeter*. 2007. 66 p. Disponível em: [www.decagon.com](http://www.decagon.com).
- DEVICES, I. D. *Em50 / Em50R / Em50G Em50 Series Data Collection System*. 2012. 93 p.
- D.G.FREDLUND; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31, p. 521–532, 1994.
- DIAMBRA, A. et al. Fibre reinforced sands: Experiments and modelling. *Geotextiles and Geomembranes*, Elsevier Ltd, v. 28, p. 238–250, 2010. ISSN 02661144.
- DOORENBOOS, J.; PRUITT, W. O. Fao 24 - crop water requirements. *L. Water Dev. Div. FAO Rome*, p. 144, 1977.
- DWYER, S. F. *Large-scale field study of landfill covers at Sandia National Laboratories*. 1998. 23 p.
- DWYER, S. F. Finding a better cover. *Civ. Eng.*, v. 71, p. 58–63, 2001. ISSN 08857024.
- EKMAN, B. M.; BROOKS, G.; RHAMDHANI, M. A. *Development of high flux solar simulators for solar thermal research*. [S.l.]: Elsevier B.V., 2015. 436-446 p.

- FERREIRA, A. M.; GERSCOVICH, D. M. S.; SOEIRO, F. J. C. P. *Avaliação de equações para interpretação do comportamento de solos residuais não saturados utilizando métodos de otimização*. 2011. 85-94 p.
- FOURIE, A. B.; PAPAGEORGIAN, G. A technique for the rapid determination of the soil moisture retention relationship and hydraulic conductivity of unsaturated soils. In: . [S.l.: s.n.], 1995.
- FREDLUND, D.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. [S.l.]: John Wiley Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2012. 939 p. ISBN 9781118133590.
- FREDLUND, D.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31, p. 521–532, 1994. ISSN 15635279.
- FREDLUND, D. G. Unsaturated soil mechanics in engineering practice unsaturated soil mechanics in engineering practice. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, v. 132, p. 286–321, 2006.
- FUTAI, M. M. *Estudo teórico-experimental do comportamento de solos tropicais não-saturados: aplicação a um caso de voçoracamento*. 597 p., 2002.
- GALLEGO, E. et al. Surface emission determination of volatile organic compounds (voc) from a closed industrial waste landfill using a self-designed static flux chamber. *Science of the Total Environment*, Elsevier B.V., v. 470-471, p. 587–599, 2014. ISSN 18791026. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.105>.
- GEE, G. W.; WARD, A. L.; MEYER, P. D. Discussion of method to estimate the storage capacity of capillary barriers, by j. stormont and c. morris. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 125, p. 918–920, 1999.
- GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Wiley, v. 44, p. 892–898, 9 1980. ISSN 03615995. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.
- HILF, J. W. *An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils*. [S.l.]: Tese (Doctored), Faculty of the Graduate Scholl of the University of Colorado, 1956. 109 p.
- HILLEL, D. *Introduction Soil Physics.pdf*. [S.l.]: Press, Academic, 1982. 167-172 p.
- HILLEL, D. *Environmental Soil Physics - Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations*. 1st edition. ed. [s.n.], 1998. ISBN 9780080544151. Disponível em: <https://www.elsevier.com/books/environmental-soil-physics/hillel/978-0-12-348525-0>.
- IBGE, I. B. de Geografia e E. *Manual Técnico de Geologia*. 1998. 1-302 p. Disponível em: <papers2://publication/uuid/267E1A98-B75A-4498-BFD6-E53024FC2842>.
- IZZO, R. L. dos S.; MAHLER, C. F.; ROSE, J. L. Barreira capilar construída com resíduo pré-tratado mecânica e biologicamente. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 18, p. 303–312, 2013.

- JUNIOR, G. de F. N. G.; MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A. *A curva de retenção de água de materiais porosos*. 2015. 205-229 p.
- KHIRE, M. V.; BENSON, C. H.; BOSSCHER, P. J. Water balance modeling of earthen final covers. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 123, p. 744–754, 1997. ISSN 10900241.
- KHIRE, M. V.; BENSON, C. H.; BOSSCHER, P. J. Capillary barriers: Design variables and water balance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 126, p. 695–708, 8 2000. ISSN 1090-0241.
- KOERNER, R. M.; DANIEL, D. E. *Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps*. [S.l.]: ASCE Press, 1997. 256 p. ISBN 9780784402610.
- KUNZE, R. J.; UEHARA, G.; GRAHAM, K. Factors important in the calculation of hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, Soil Science Society of America, v. 32, p. 760, 1968.
- Kämpf, M.; MONTENEGRO, H. On the performance of capillary barriers as landfill cover. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 4, p. 925–929, 1997.
- LEONG, E. C.; TRIPATHY, S.; RAHARDJO, H. Total suction measurement of unsaturated soils with a device using the chilled-mirror dew-point technique. *Geotechnique*, v. 53, p. 173–182, 2003. ISSN 00168505.
- LI, J. et al. Numerical investigation of the performance of covers with capillary barrier effects in south china. *Computers and Geotechnics*, v. 48, p. 304–315, 3 2013. ISSN 0266352X. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266352X12001838>.
- LIMA, F. A. L. V. *Transporte de contaminantes oriundos da água de produção da indústria petrolífera em solos arenos argilosos compactados*. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Programa de pós graduação em Engenharia Civil, 2018.
- LIMA, M. J. de. *Utilização de geotêxtil não tecido como elemento constituinte de barreiras capilares*. [S.l.]: Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Programa de Pós Graduação em Geotecnia, 2014. -128 p.
- LLORET, A.; ALONSO, E. E. Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behaviour. *Geotechnique*, v. 30, p. 449–477, 1980. ISSN 17517656.
- MACHADO, S. L. et al. Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results. *Waste Management*, Elsevier Ltd, v. 29, p. 153–161, 2009. ISSN 0956053X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.017>.
- MACHADO, S. L.; DOURADO, K. A. Novas técnicas para obtenção da curva característica de sucção do solo. In: . [S.l.: s.n.], 2001. p. 325–336.
- MAGALHÃES, A. de F. *Avaliação do desempenho de técnicas de bioengenharia na proteção e conservação da cobertura final de taludes em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos: Estudo de caso para o aterro sanitário de Belo Horizonte, MG*. [S.l.]: Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2005. -186 p.

- MARIANO, M. O. H.; JUCÁ, J. F. T. Ensaios de campo para determinação de emissões de biogás em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. *Eng. Sanit. e Ambient.*, v. 15, p. 223–228, 2010.
- MARINHO, F. A. M. Mecânica dos solos não saturados : Na prática da engenharia. 2009.
- MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A.; JUNIOR, G. de F. N. G. *Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção*. 2015. 230-256. p.
- MARSHALL, T. J. A relation between permeability and size distribution of pores. *Journal of Soil Science*, v. 9, p. 1–8, 1958.
- MATEUS, M. do S. C. S. *Proposta de Modelo para Avaliação do Balanço Hídrico de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso do Aterro Metropolitano Centro de Salvador-BA*. [S.l.]: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós Graduação de Engenharia, 2008. -336 p.
- MCCARTNEY, J. S.; ZORNBERG, J. G. Design and performance criteria for evapotranspirative cover systems. *Proceedings of the Fifth International Conference on Environmental Geotechnics*, v. 1, p. 195–200, 2002.
- MONTAZER, P.; WILSON, W. E. *Conceptual hydrologic model of flow in the unsaturated zone, Yucca Mountain, Nevada*. 1984.
- MORRIS, C. E.; STORMONT, J. C. Parametric study of unsaturated drainage layers in a capillary barrier. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 125, p. 1057–1065, 1999. ISSN 1090-0241.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, v. 12, p. 513–522, 1976. ISSN 19447973.
- NG, C. W. et al. Physical and numerical modeling of an inclined three-layer (silt/gravelly sand/clay) capillary barrier cover system under extreme rainfall. *Waste Management*, v. 38, p. 210–221, 4 2015. ISSN 0956053X.
- NISSEN, H.; MOLDRUP, P.; KACHANOSKI, R. Time domain reflectometry measurements of solute transport across a soil layer boundary. *Soil Science Society of America Journal*, v. 64, p. 62, 2000.
- NYHAN, J. W.; HAKONSON, T. E.; DRENNON, B. J. A water balance study of two landfill cover designs for semiarid regions. *Journal of Environmental Quality*, v. 19, p. 281–288, 1990. ISSN 00472425.
- NYHAN, J. W.; SCHOFIELD, T. G.; SALAZAR, J. A. Water balance study of four landfill cover designs varying in slope for semi-arid regions. In: . [S.l.]: Los Alamos National Laboratory, 1997. p. 1–8.
- OLIVEIRA, O. M.; MARINHO, F. A. M. Estudo de barreiras capilares por meio de simulação de chuva em coluna de solo. *VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados 2007/ Salvador-Bahia*, v. 1, p. 291–297, 2007.
- OLIVEIRA, O. M. de. Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado. *Dep. Eng. Estruturas e Fundações*, Doutor em, p. 361, 2004.

- PARENT, S. E.; CABRAL, A. Design of inclined covers with capillary barrier effect. *Geotech. Geol. Eng.*, v. 24, p. 689–710, 2006. ISSN 09603182.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and physical sciences*, v. 193, p. 120–145, 1948. ISSN 09501207.
- RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics*, v. 1, p. 318–333, 1931. ISSN 01486349.
- ROSS, B. The diversion capacity of capillary barriers. *Water Resources Research*, v. 26, p. 2625–2629, 10 1990. ISSN 00431397.
- SAMUEL-ROSA, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. de A. Caracterização do solo de cobertura de aterros encerrados com ferramentas (geo)estatísticas. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 16, p. 121–126, 2011.
- SCHEUTZ, C. et al. Mitigation of methane emission from fake landfill using a biowindow system. *Waste Manag.*, Elsevier Ltd, v. 31, p. 1018–1028, 2011. ISSN 0956053X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.024>.
- SCHEUTZ, C. et al. Mitigation of methane emission from an old unlined landfill in klintholm, denmark using a passive biocover system. *Waste Management*, Elsevier Ltd, v. 34, p. 1179–1190, 2014. ISSN 18792456. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.03.015>.
- SCHROEDER, P. R. et al. *The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model, Engineering documentation for version 3*. 1994. 116 p.
- SCHROTH, M. H. et al. Above and below ground methane fluxes and methanotrophic activity in a landfill cover soil. *Waste Management*, Elsevier Ltd, v. 32, p. 879–889, 2012. ISSN 0956053X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.11.003>.
- SILVA, P. A. D. *Estudo do fenômeno de barreira Capilar: Modelagem numérica e experimentação física*. [S.l.]: Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2011. 187 p.
- SILVA, T. N.; FREITAS, F. S. N. de; CANDIANI, G. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. *Eng. Sanit. e Ambient.*, v. 18, p. 95–104, 2013.
- SMITH, M.; ALLEN, R.; PEREIRA, L. Revised fao methodology for crop-water requirements. *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, p. 51–58, 1998.
- SOUSA, R. *Estudo dos fluxos de óleo diesel e água em solos não saturados: desenvolvimento experimental e modelagem matemática*. [S.l.]: Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Programa de pós graduação em Engenharia Industrial, 2012. 282 p.
- SOUSA, R. G. U. *Estudo em colunas da percolação de óleo bruto, água de produção e efluente tratado de petróleo em solos naturais do Rio Grande do Norte e do Céara*. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Programa de pós graduação em Engenharia Civil, 2018. -192 p.

- SOUZA, P. S. *Comportamento mecânico e hidráulico do solo residual do granulito-gnaiss de Salvador e sua aplicação no estudo de mecanismos de instabilização de taludes*. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana, 2006. 203 p.
- STORMONT, J. C. The effectiveness of two capillary barriers on a 10 *Geotechnical and Geological Engineering*, Springer Netherlands, v. 14, p. 243–267, 1996. ISSN 09603182.
- STORMONT, J. C.; ANDERSON, C. E. Capillary barrier effect from underlying coarser soil layer. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 125, p. 641–648, 8 1999. ISSN 1090-0241.
- STORMONT, J. C.; MORRIS, C. E. Method to estimate water storage capacity of capillary barriers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 124, p. 297–302, 1998. ISSN 10900241.
- TAMI, D. et al. Design and laboratory verification of a physical model of sloping capillary barrier. *Canadian Geotechnical Journal*, Canadian Science Publishing, v. 41, p. 814–830, 9 2004. ISSN 0008-3674. Disponível em: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/t04-036>).
- TEIXEIRA, P. F. *Oxidação Biológica do Metano em Coberturas de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos : Dinâmica do Processo e Aspectos Geotécnicos*. [S.l.]: Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 2008. 167 p.
- TIDWELL, V. C. et al. Visualization experiment to investigate capillary barrier performance in the context of a yucca mountain emplacement drift. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 62-63, p. 287–301, 2003. ISSN 01697722.
- TROVATTO, A. de M. Avaliação de barreira capilar em interface não saturada solo-geossintéticos. 2014.
- VIEIRA, A. M. *Estudo de Barreiras Capilares como cobertura final de aterro de resíduos*. [S.l.]: Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 2005. 287 p.
- VILELA, W. A. *Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar*. [S.l.]: Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Curso de Pós Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais, 2010.
- WARD, A. L.; GEE, G. W. Performance evaluation of a field-scale surface barrier. *Journal of Environmental Quality*, American Soc of Agronomy Inc, v. 26, p. 694–705, 1997. ISSN 00472425.
- WEBB, S. W. Generalization of ross' tilted capillary barrier diversion formula for different two-phase characteristic curves. *Water Resources Research*, v. 33, p. 1855–1859, 1997. ISSN 00431397.
- WMO. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. 2008. Disponível em: [www.wmo.int](http://www.wmo.int)).
- YANG, H. et al. A study of infiltration on three sand capillary barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 41, p. 629–643, 2004. ISSN 00083674.

YEH, T.-C. J.; GELHAR, L. W.; GUTJAHR, A. L. Stochastic analysis of unsaturated flow in heterogeneous soils: 3. observations and applications. *Water Resources Research*, v. 21, p. 465–471, 4 1985. ISSN 00431397.

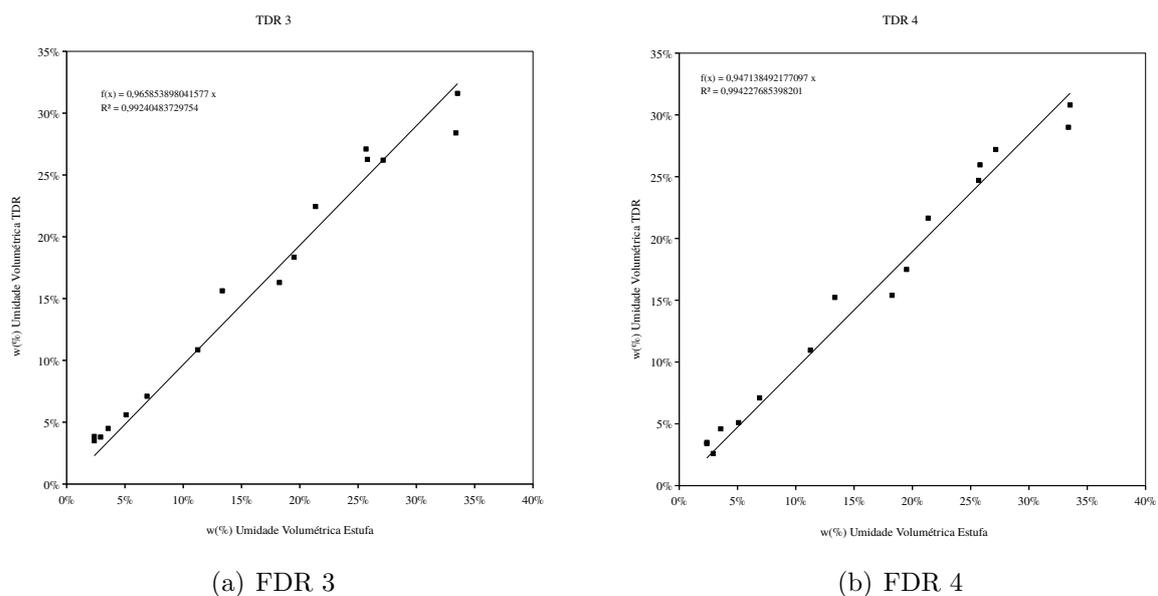
ZHAN, T. L. et al. Physical and numerical study of lateral diversion by three-layer inclined capillary barrier covers under humid climatic conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 51, p. 1438–1448, 12 2014. ISSN 0008-3674.

# Apêndice A

## Calibração dos demais FDR's

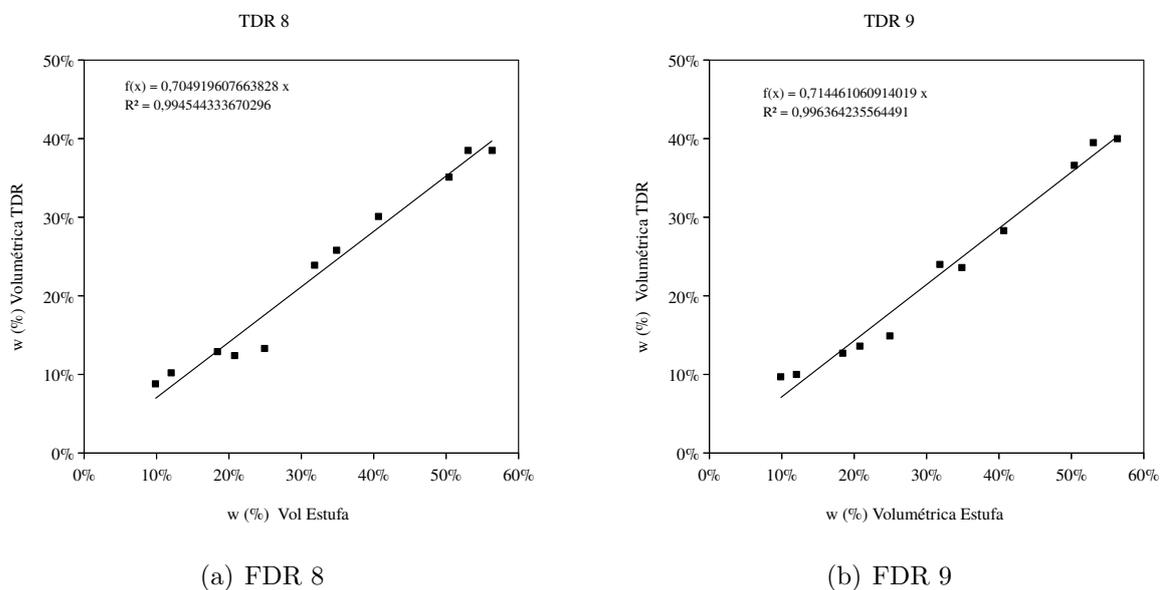
### A.1 Continuação FDR's calibrados para a areia de duna

Figura A.1: Calibração dos FDR's 3 e 4.



## A.2 Continuação FDR's calibrados para o rigolito

Figura A.2: Curvas de calibração dos FDR's 8 e 9.



## A.3

Figura A.3: Curvas de calibração dos FDR's 10 e 11.

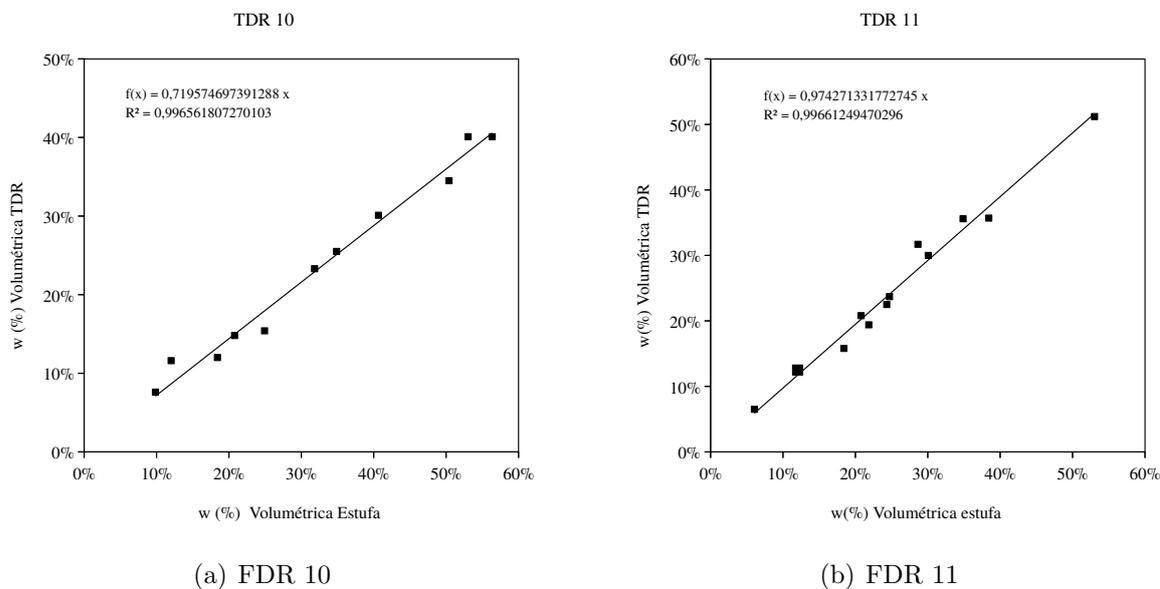
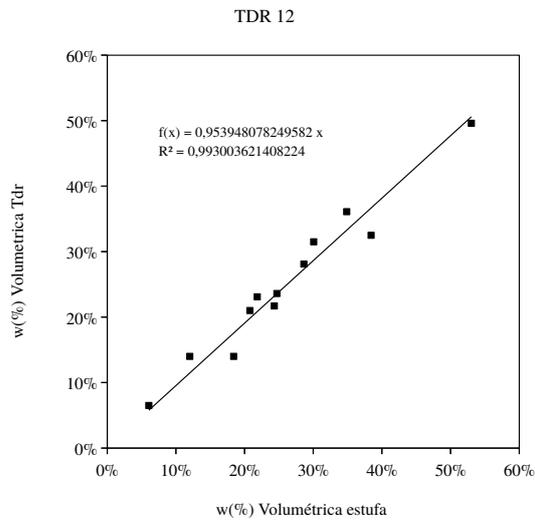
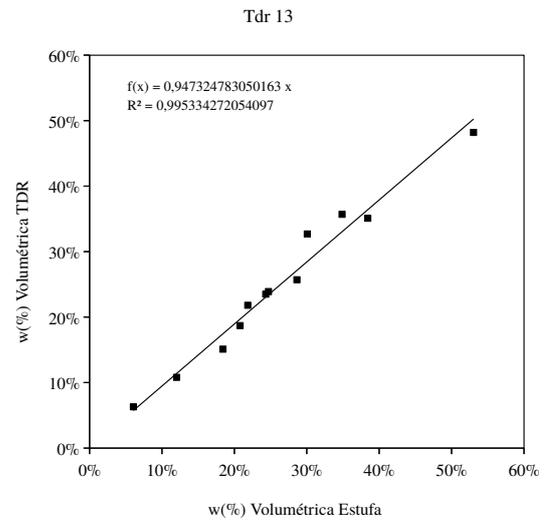


Figura A.4: Curvas de calibração dos FDR's 12 e 13.

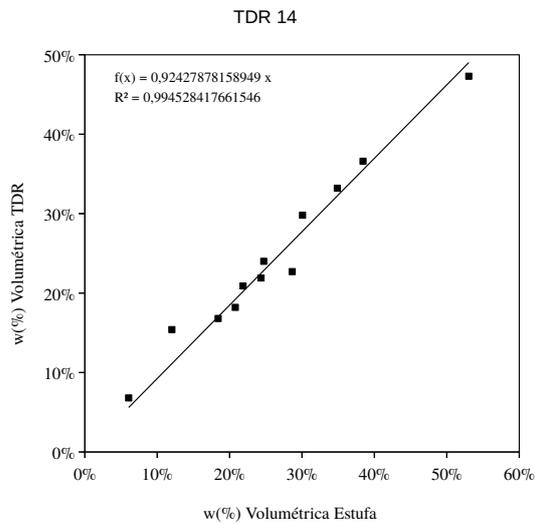


(a) FDR 12

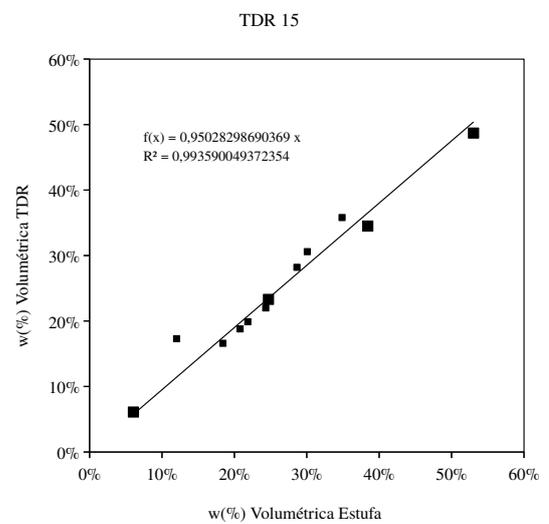


(b) FDR 13

Figura A.5: Curvas de calibração dos FDR's 14 e 15.



(a) FDR 14



(b) FDR 15

# Apêndice B

## Valores de umidade e sucção dos ensaios

Tabela B.1: Dados do perfil de umidade 1 - Ensaio 1.

Data	Arg. 5 cm	Arg. 15 cm	Arg. 25 cm	Areia 35 cm	Dia	Precipitação
17/09/20	0,278	0,213	0,272	0,077	1	-
18/09/20	0,152	0,213	0,271	0,077	2	-
19/09/20	0,147	0,213	0,271	0,077	3	-
20/09/20	0,145	0,213	0,270	0,077	4	-
21/09/20	0,142	0,210	0,271	0,077	5	-
22/09/20	0,141	0,209	0,270	0,077	6	-
23/09/20	0,139	0,209	0,269	0,077	7	-
24/09/20	0,136	0,209	0,265	0,073	8	-
25/09/20	0,304	0,208	0,268	0,075	9	45
26/09/20	0,250	0,212	0,270	0,075	10	-
27/09/20	0,233	0,213	0,271	0,075	11	-
28/09/20	0,213	0,213	0,273	0,076	12	-
02/10/20	0,156	0,210	0,269	0,075	15	-
07/10/20	0,145	0,207	0,265	0,075	20	-
12/10/20	0,137	0,203	0,257	0,075	25	-
17/10/20	0,126	0,199	0,245	0,072	30	-
22/10/20	0,129	0,197	0,246	0,070	35	-
27/10/20	0,120	0,193	0,242	0,070	40	-
01/11/20	0,121	0,192	0,239	0,069	45	-
06/11/20	0,117	0,189	0,235	0,069	50	-
11/11/20	0,116	0,188	0,231	0,069	55	-
16/11/20	0,112	0,186	0,233	0,068	60	-
21/11/20	0,103	0,186	0,226	0,067	65	-
26/11/20	0,096	0,182	0,219	0,066	70	-
01/12/20	0,093	0,182	0,221	0,065	75	-
06/12/20	0,087	0,183	0,221	0,064	80	-
11/12/20	0,082	0,181	0,218	0,063	85	-

16/12/20	0,076	0,178	0,216	0,062	90	-
21/12/20	0,073	0,179	0,217	0,061	95	-
26/12/20	0,065	0,179	0,209	0,059	100	-
31/12/20	0,059	0,178	0,209	0,059	105	-
05/01/21	0,055	0,177	0,213	0,058	110	-
10/01/21	0,050	0,177	0,212	0,059	115	-
15/01/21	0,047	0,172	0,211	0,060	120	-
20/01/21	0,044	0,172	0,210	0,059	125	-
22/01/21	0,301	0,175	0,211	0,059	127	5
23/01/21	0,230	0,184	0,216	0,058	128	-
24/01/21	0,214	0,186	0,220	0,058	129	-
25/01/21	0,205	0,188	0,223	0,058	130	-
30/01/21	0,167	0,191	0,238	0,061	135	-
04/02/21	0,156	0,190	0,235	0,060	140	-
09/02/21	0,258	0,191	0,236	0,059	145	18
10/02/21	0,225	0,191	0,236	0,059	146	-
11/02/21	0,212	0,192	0,238	0,059	147	-
12/02/21	0,204	0,191	0,239	0,059	148	-
13/02/21	0,198	0,191	0,240	0,059	149	-
14/02/21	0,193	0,192	0,240	0,059	150	-
19/02/21	0,197	0,191	0,240	0,059	154	-
24/02/21	0,190	0,192	0,237	0,060	159	-
01/03/21	0,191	0,193	0,238	0,060	164	-
06/03/21	0,220	0,196	0,241	0,060	169	18
11/03/21	0,212	0,197	0,245	0,061	174	-
16/03/21	0,197	0,192	0,245	0,061	179	-
20/03/21	0,253	0,201	0,249	0,061	184	24
23/03/21	0,236	0,203	0,252	0,061	187	-
24/03/21	0,273	0,205	0,252	0,060	188	5
27/03/21	0,230	0,205	0,255	0,060	191	-
29/03/21	0,301	0,206	0,255	0,060	193	10
31/03/21	0,243	0,206	0,261	0,061	195	-
01/04/21	0,233	0,206	0,259	0,061	196	-
03/04/21	0,221	0,206	0,259	0,061	198	-
05/04/21	0,213	0,207	0,260	0,062	200	-
08/04/21	0,234	0,207	0,258	0,061	203	5
11/04/21	0,212	0,208	0,258	0,062	206	-
13/04/21	0,208	0,208	0,259	0,062	208	-
19/04/21	0,202	0,208	0,253	0,063	214	-
20/04/21	0,269	0,211	0,252	0,062	215	5
21/04/21	0,247	0,211	0,252	0,062	216	-
23/04/21	0,220	0,211	0,252	0,063	218	-
25/04/21	0,213	0,213	0,252	0,063	220	-
27/04/21	0,315	0,217	0,250	0,063	222	15
28/04/21	0,274	0,216	0,259	0,063	223	-

30/04/21	0,246	0,216	0,261	0,062	225	-
02/05/21	0,226	0,218	0,261	0,062	227	-
04/05/21	0,218	0,215	0,260	0,062	229	-
09/05/21	0,221	0,219	0,257	0,061	234	-
10/05/21	0,347	0,221	0,255	0,061	235	15
11/05/21	0,288	0,221	0,270	0,060	236	-
12/05/21	0,317	0,221	0,269	0,060	237	5
13/05/21	0,315	0,222	0,274	0,061	238	13
14/05/21	0,275	0,224	0,272	0,060	239	-
15/05/21	0,259	0,224	0,270	0,059	240	-
16/05/21	0,247	0,221	0,269	0,059	241	-
18/05/21	0,323	0,221	0,265	0,060	243	15
19/05/21	0,272	-	0,275	0,058	244	-
20/05/21	0,256	-	0,273	0,058	245	-
21/05/21	0,313	-	0,274	0,059	246	24
22/05/21	0,278	-	0,279	0,163	247	-
23/05/21	0,270	-	0,277	0,126	248	-
24/05/21	0,244	-	0,275	0,115	249	-
25/05/21	0,239	-	0,274	0,110	250	-
26/05/21	0,234	-	0,273	0,106	251	-
27/05/21	0,230	-	0,272	0,103	252	-
28/05/21	0,226	-	0,270	0,101	253	-
29/05/21	0,222	-	0,269	0,100	254	-
30/05/21	0,220	-	0,269	0,099	255	-
31/05/21	0,219	-	0,267	0,097	256	-
01/06/21	0,219	-	0,266	0,096	257	-
02/06/21	0,218	-	0,264	0,094	258	-
03/06/21	0,218	-	0,263	0,094	259	-
04/06/21	0,217	-	0,261	0,093	260	-
05/06/21	0,217	-	0,260	0,093	261	-
06/06/21	0,218	-	0,259	0,092	262	-
07/06/21	0,277	-	0,258	0,092	263	-
08/06/21	0,282	-	0,279	0,091	264	-
09/06/21	0,286	-	0,275	0,091	265	18
10/06/21	0,271	-	0,282	0,175	266	-
11/06/21	0,263	-	0,276	0,162	267	-
12/06/21	0,254	-	0,274	0,132	268	-
13/06/21	0,249	-	0,273	0,120	269	-
14/06/21	0,243	-	0,272	0,114	270	-
15/06/21	0,237	-	0,270	0,110	271	-
16/06/21	0,292	-	0,269	0,108	272	-
18/06/21	-	-	0,285	0,145	273	-

Tabela B.2: Dados do perfil de sucção 1 - Ensaio 1.

Data	Arg. 5 cm	Arg. 15 cm	Arg. 25 cm	Areia 35 cm	Dia	Precipitação
17/09/20	457,12	1.151,93	808,77	-	1	-
18/09/20	570,20	1.149,55	804,50	-	2	-
19/09/20	580,00	1.075,79	804,50	-	3	-
20/09/20	590,37	1.043,58	817,95	-	4	-
21/09/20	604,54	1.047,92	805,98	-	5	-
22/09/20	617,77	1.054,45	804,50	-	6	-
23/09/20	616,77	1.056,88	798,23	-	7	-
24/09/20	645,84	1.153,26	879,08	-	8	-
25/09/20	11,40	1.146,37	925,18	-	9	45
26/09/20	79,82	595,01	796,39	-	10	-
27/09/20	342,47	603,01	680,34	-	11	-
28/09/20	467,44	648,08	611,68	-	12	-
02/10/20	530,18	940,21	669,00	-	15	-
07/10/20	566,93	1.074,05	869,21	-	20	-
12/10/20	400,52	937,40	964,11	-	25	-
17/10/20	412,69	972,81	1.072,82	-	30	-
22/10/20	445,48	1.160,45	1.080,50	-	35	-
27/10/20	416,03	1.025,01	1.205,11	-	40	-
01/11/20	473,40	1.188,03	1.411,97	-	45	-
06/11/20	421,92	1.024,30	1.214,58	-	50	-
11/11/20	607,75	1.026,66	1.204,55	-	55	-
16/11/20	608,17	1.189,40	1.201,51	-	60	-
21/11/20	627,23	1.179,03	1.311,98	-	65	-
26/11/20	671,16	1.189,67	1.414,90	-	70	-
01/12/20	637,57	1.310,47	1.329,31	-	75	-
06/12/20	-	1.270,94	1.216,82	-	80	-
11/12/20	-	-	1.283,00	-	85	-
16/12/20	653,77	653,77	782,58	-	90	-
21/12/20	628,53	628,53	822,48	-	95	-
26/12/20	654,83	654,83	808,77	-	100	-
31/12/20	663,17	663,17	757,05	-	105	-
05/01/21	666,08	666,08	723,65	-	110	-
10/01/21	660,73	660,73	721,15	-	115	-
15/01/21	734,22	1.234,32	-	-	120	-
20/01/21	724,81	1.203,72	-	12,20	125	-
22/01/21	13,20	1.023,12	817,20	12,00	127	5
23/01/21	152,34	713,22	792,37	-	128	-
24/01/21	407,59	755,83	851,78	-	129	-
25/01/21	486,21	782,40	796,02	-	130	-
30/01/21	503,41	877,66	847,47	-	135	-
04/02/21	528,72	1.002,83	790,36	12,00	140	-
09/02/21	41,68	1.002,83	793,46	12,00	145	18
10/02/21	150,22	954,39	790,36	-	146	-

11/02/21	417,76	938,86	847,47	-	147	-
12/02/21	462,30	930,38	793,46	-	148	-
13/02/21	468,95	693,63	790,36	-	149	-
14/02/21	473,18	732,36	851,78	-	150	-
19/02/21	465,51	646,73	796,02	-	154	-
24/02/21	488,12	844,16	790,36	-	159	-
01/03/21	486,44	784,20	796,02	-	164	-
06/03/21	275,31	348,44	792,46	12,00	169	18
11/03/21	456,27	483,09	857,24	-	174	-
16/03/21	481,09	529,55	850,78	-	179	-
20/03/21	51,85	54,92	795,02	12,30	184	24
23/03/21	398,22	84,20	946,47	-	187	-
24/03/21	227,21	98,84	816,20	12,00	188	5
27/03/21	442,72	90,89	791,37	-	191	-
29/03/21	12,64	58,32	850,78	11,70	193	10
31/03/21	106,74	59,65	795,02	-	195	-
01/04/21	281,66	63,01	853,78	-	196	-
03/04/21	437,25	77,88	913,97	-	198	-
05/04/21	461,24	135,90	1.216,58	-	200	-
08/04/21	239,84	302,08	1.206,55	11,20	203	5
11/04/21	467,44	173,43	1.203,51	-	206	-
13/04/21	475,04	244,64	818,20	-	208	-
19/04/21	496,62	574,42	793,37	-	214	-
20/04/21	492,75	658,46	852,78	11,20	215	5
21/04/21	409,10	475,58	1.412,97	-	216	-
23/04/21	498,11	419,01	1.215,58	-	218	-
25/04/21	501,79	515,97	1.205,55	-	220	-
27/04/21	11,99	153,51	1.202,51	11,20	222	15
28/04/21	40,69	56,02	817,20	-	223	-
30/04/21	142,14	64,94	792,37	-	225	-
02/05/21	420,56	84,36	851,78	-	227	-
04/05/21	496,97	139,36	841,97	-	229	-
09/05/21	485,99	507,61	887,20	-	234	-
10/05/21	12,30	49,74	817,20	11,40	235	15
11/05/21	15,98	48,20	847,20	-	236	-
12/05/21	11,80	41,48	790,36	11,20	237	5
13/05/21	11,80	35,75	847,47	9,70	238	13
14/05/21	23,04	38,65	793,46	-	239	-
15/05/21	41,52	41,65	890,36	-	240	-
16/05/21	59,02	43,46	851,78	-	241	-
18/05/21	11,80	31,67	796,02	9,70	243	15
19/05/21	24,06	36,60	791,37	-	244	-
20/05/21	40,59	40,40	850,78	-	245	-
21/05/21	11,59	21,39	795,02	3,70	246	24
22/05/21	19,13	28,08	946,47	3,20	247	-

23/05/21	27,81	32,06	816,20	-	248	-
24/05/21	63,07	40,80	791,37	-	249	-
25/05/21	91,75	43,01	850,78	-	250	-
26/05/21	150,25	45,13	795,02	-	251	-
27/05/21	228,05	47,13	846,47	-	252	-
28/05/21	298,28	49,57	989,36	-	253	-
29/05/21	342,95	52,39	792,46	-	254	-
30/05/21	398,59	57,87	680,34	-	255	-
31/05/21	421,14	67,47	611,68	-	256	-
01/06/21	433,94	82,30	669,00	-	257	-
02/06/21	445,58	103,38	869,21	-	258	-
03/06/21	453,45	132,23	964,11	-	259	-
04/06/21	468,19	172,55	1.072,82	-	260	-
05/06/21	468,30	209,52	1.080,50	-	261	-
06/06/21	433,64	211,95	1.205,11	-	262	-
07/06/21	23,37	29,49	1.411,97	-	263	-
08/06/21	17,69	25,00	611,68	-	264	-
09/06/21	19,56	26,57	669,00	-	265	18
10/06/21	28,26	30,52	791,37	-	266	-
11/06/21	35,34	33,79	795,02	-	267	-
12/06/21	43,97	36,81	769,00	-	268	-
13/06/21	50,46	40,11	669,00	-	269	-
14/06/21	66,70	41,83	660,00	-	270	-
15/06/21	109,25	43,31	649,00	1,90	271	-
16/06/21	10,84	19,39	-	-	272	-
18/06/21	-	-	-	-	273	-

Tabela B.3: Dados do perfil de umidade 2 - Ensaio 1.

Data	Arg. 5 cm	Arg. 15 cm	Arg. 25 cm	Areia 35 cm	Dia	Precipitação
17/09/20	0,237	0,198	0,271	0,086	1	-
18/09/20	0,217	0,193	0,263	0,087	2	-
19/09/20	0,214	0,185	0,252	0,086	3	-
20/09/20	0,214	0,180	0,242	0,084	4	-
21/09/20	0,215	0,174	0,239	0,084	5	-
22/09/20	0,214	0,170	0,239	0,085	6	-
23/09/20	0,214	0,168	0,236	0,084	7	-
24/09/20	0,210	0,165	0,233	0,083	8	-
25/09/20	0,330	0,164	0,236	0,084	9	45
26/09/20	0,218	0,179	0,242	0,232	10	-
27/09/20	0,204	0,184	0,245	0,219	11	-
28/09/20	0,199	0,186	0,246	0,210	12	-

02/10/20	0,199	0,180	0,247	0,180	15	-
07/10/20	0,198	0,178	0,245	0,142	20	-
12/10/20	0,195	0,174	0,242	0,112	25	-
17/10/20	0,194	0,167	0,239	0,101	30	-
22/10/20	0,184	0,159	0,232	0,096	35	-
27/10/20	0,181	0,155	0,230	0,094	40	-
01/11/20	0,178	0,152	0,227	0,091	45	-
06/11/20	0,158	0,129	0,224	0,087	50	-
11/11/20	0,150	0,130	0,222	0,084	55	-
16/11/20	0,147	0,123	0,217	0,082	60	-
21/11/20	0,173	0,122	0,214	0,079	65	-
26/11/20	0,167	0,125	0,208	0,076	70	-
01/12/20	0,161	0,121	0,204	0,074	75	-
06/12/20	0,156	0,124	0,204	0,072	80	-
11/12/20	0,147	0,124	0,202	0,070	85	-
16/12/20	0,142	0,125	0,202	0,067	90	-
21/12/20	0,138	0,126	0,202	0,066	95	-
26/12/20	0,118	0,125	0,201	0,064	100	-
31/12/20	0,118	0,125	0,201	0,063	105	-
05/01/21	0,123	0,122	0,201	0,061	110	-
10/01/21	-	-	0,201	0,061	115	-
15/01/21	0,117	0,122	0,198	0,058	120	-
20/01/21	0,115	0,122	0,198	0,058	125	-
22/01/21	0,391	0,136	0,295	0,151	127	5
23/01/21	0,199	0,174	0,301	0,195	128	-
24/01/21	0,179	0,180	0,298	0,179	129	-
25/01/21	0,172	0,183	0,296	0,159	130	-
30/01/21	0,163	0,186	0,283	0,129	135	-
04/02/21	0,163	0,182	0,262	0,118	140	-
09/02/21	0,267	0,183	0,241	0,112	145	18
10/02/21	0,174	0,184	0,241	0,111	146	-
11/02/21	0,172	0,185	0,243	0,110	147	-
12/02/21	0,170	0,184	0,243	0,109	148	-
13/02/21	0,170	0,184	0,243	0,108	149	-
14/02/21	0,169	0,183	0,242	0,107	150	-
19/02/21	0,164	0,175	0,228	0,100	154	-
24/02/21	0,206	0,179	0,226	0,098	159	-
01/03/21	0,177	#N/DISP	0,224	0,097	164	-
06/03/21	0,285	0,193	0,227	0,096	169	18
11/03/21	0,244	-	0,227	0,096	174	-
16/03/21	0,231	-	0,297	0,115	179	-
20/03/21	0,254	-	-	-	184	24
23/03/21	0,229	0,299	0,194	0,119	187	-
24/03/21	0,291	0,311	0,199	0,120	188	5
27/03/21	0,220	0,301	0,196	0,122	191	-

29/03/21	0,377	0,310	0,195	0,119	193	10
31/03/21	0,214	0,301	0,204	0,149	195	-
01/04/21	0,209	0,297	0,202	0,144	196	-
03/04/21	0,203	0,293	0,199	0,134	198	-
05/04/21	0,230	0,294	0,196	0,127	200	-
08/04/21	0,207	0,292	0,193	0,118	203	5
11/04/21	0,214	0,282	0,193	0,113	206	-
13/04/21	0,207	0,277	0,192	0,110	208	-
19/04/21	0,201	0,282	0,186	0,102	214	-
20/04/21	0,241	0,291	0,183	0,101	215	5
21/04/21	0,223	0,294	0,184	0,099	216	-
23/04/21	0,211	0,293	0,188	0,097	218	-
25/04/21	0,203	0,294	0,188	0,095	220	-
27/04/21	0,245	0,301	0,185	0,093	222	15
28/04/21	0,270	0,307	0,188	0,091	223	-
30/04/21	0,242	0,302	0,188	0,091	225	-
02/05/21	0,222	0,298	0,186	0,091	227	-
04/05/21	0,339	0,311	0,183	0,090	229	-
09/05/21	0,236	0,305	0,184	0,090	234	-
10/05/21	0,349	0,306	0,232	0,115	235	15
11/05/21	0,303	0,306	0,232	0,119	236	-
12/05/21	0,361	0,308	0,234	0,149	237	5
13/05/21	0,372	0,307	0,282	0,151	238	13
14/05/21	0,281	0,307	0,283	0,122	239	-
15/05/21	0,261	0,306	0,282	0,110	240	-
16/05/21	0,260	0,308	0,284	0,110	241	-
18/05/21	0,315	0,307	0,297	0,195	243	15
19/05/21	0,263	0,308	0,299	0,180	244	-
20/05/21	0,248	0,306	0,301	0,159	245	-
21/05/21	0,336	0,307	0,301	0,189	246	24
22/05/21	0,269	0,310	0,303	0,179	247	-
23/05/21	0,236	0,307	0,303	0,159	248	-
24/05/21	0,228	0,306	0,303	0,149	249	-
25/05/21	0,221	0,305	0,309	0,139	250	-
26/05/21	0,216	0,304	0,309	0,179	251	-
27/05/21	0,211	0,302	0,304	0,192	252	-
28/05/21	0,208	0,302	0,309	0,223	253	-
29/05/21	0,206	0,299	0,304	0,219	254	-
30/05/21	0,202	0,297	0,303	0,214	255	-
31/05/21	0,202	0,296	0,303	0,210	256	-
01/06/21	0,203	0,289	0,309	0,206	257	-
02/06/21	0,207	0,290	0,309	0,201	258	-
03/06/21	0,267	0,310	0,304	0,197	259	-
04/06/21	0,271	0,311	0,309	0,193	260	-
05/06/21	0,270	0,311	0,304	0,188	261	-

06/06/21	0,263	0,310	0,303	0,184	262	-
07/06/21	0,260	0,309	0,303	0,180	263	-
08/06/21	0,256	0,308	0,309	0,175	264	-
09/06/21	0,256	0,308	0,309	0,219	265	18
10/06/21	0,252	0,308	0,304	0,214	266	-
11/06/21	0,244	0,306	0,309	0,210	267	-
12/06/21	0,350	0,310	0,304	-	268	-
13/06/21	-	-	-	-	269	-
14/06/21	-	-	-	-	270	-
15/06/21	-	-	-	-	271	-
16/06/21	-	-	-	-	272	-
18/06/21	-	-	-	-	273	-

Tabela B.4: Dados do perfil de sucção 2 - Ensaio 1.

Data	Arg. 5 cm	Arg. 15 cm	Arg. 25 cm	Areia 35 cm	Dia	Precipitação
17/09/20	850,21	523,15	-	-	1	-
18/09/20	883,74	615,36	-	-	2	-
19/09/20	870,62	507,84	-	-	3	-
20/09/20	878,76	951,10	1.279,16	-	4	-
21/09/20	904,75	955,71	1.340,37	-	5	-
22/09/20	832,51	988,39	1.444,20	-	6	-
23/09/20	884,23	-	1.438,55	-	7	-
24/09/20	60,58	1.146,64	1.480,90	-	8	-
25/09/20	269,85	615,36	1.564,32	-	9	45
26/09/20	595,29	507,84	1.479,20	-	10	-
27/09/20	844,36	951,10	1.157,25	-	11	-
28/09/20	851,39	955,71	965,22	-	12	-
02/10/20	883,74	988,39	1.013,04	-	15	-
07/10/20	870,62	986,39	1.206,50	-	20	-
12/10/20	878,76	984,39	1.209,56	-	25	-
17/10/20	639,25	982,39	1.268,60	-	30	-
22/10/20	904,75	717,15	1.212,34	-	35	-
27/10/20	832,51	573,08	1.334,22	-	40	-
01/11/20	884,23	902,12	1.512,61	-	45	-
06/11/20	924,76	627,01	1.318,94	-	50	-
11/11/20	918,39	1.041,66	1.299,35	-	55	-
16/11/20	866,81	1.037,79	1.296,96	-	60	-
21/11/20	850,37	988,21	1.379,83	-	65	-
26/11/20	749,23	1.057,76	1.486,03	-	70	-
01/12/20	843,84	999,91	1.372,86	-	75	-
06/12/20	841,67	977,84	1.292,49	-	80	-

11/12/20	673,91	1.068,37	1.319,25	-	85	-
16/12/20	1.021,71	1.273,58	-	-	90	-
21/12/20	974,38	1.162,59	-	-	95	-
26/12/20	1.020,06	1.180,66	-	-	100	-
31/12/20	1.029,03	1.174,97	-	-	105	-
05/01/21	1.026,66	1.160,18	-	-	110	-
10/01/21	1.017,95	1.139,27	-	-	115	-
15/01/21	1.022,18	1.048,40	1.308,36	-	120	-
20/01/21	1.018,42	1.018,18	1.291,89	-	125	-
22/01/21	21,03	210,97	1.207,61	4,20	127	5
23/01/21	75,91	179,57	1.055,18	-	128	-
24/01/21	139,48	175,12	862,04	-	129	-
25/01/21	232,50	175,92	737,44	-	130	-
30/01/21	638,45	727,15	627,37	-	135	-
04/02/21	687,11	466,26	729,17	-	140	-
09/02/21	94,26	133,76	781,67	6,10	145	18
10/02/21	238,08	134,40	745,29	-	146	-
11/02/21	497,60	378,99	708,80	-	147	-
12/02/21	375,39	457,39	679,87	-	148	-
13/02/21	514,67	453,39	678,31	-	149	-
14/02/21	574,87	947,60	697,47	-	150	-
19/02/21	803,66	922,84	720,49	-	154	-
24/02/21	802,82	881,13	778,44	-	159	-
01/03/21	792,89	947,22	799,51	-	164	-
06/03/21	18,51	295,75	709,95	7,40	169	18
11/03/21	806,89	968,78	618,05	-	174	-
16/03/21	1.013,79	1.034,50	626,65	-	179	-
20/03/21	57,28	329,33	226,06	8,20	184	24
23/03/21	269,73	144,42	167,58	-	187	-
24/03/21	211,17	99,02	167,77	7,90	188	5
27/03/21	445,38	92,33	148,43	-	191	-
29/03/21	13,15	54,39	105,47	3,80	193	10
31/03/21	116,10	60,16	79,33	-	195	-
01/04/21	293,72	63,71	79,51	-	196	-
03/04/21	440,48	80,06	80,49	-	198	-
05/04/21	463,47	141,65	82,40	-	200	-
08/04/21	179,57	306,57	89,87	7,40	203	5
11/04/21	469,60	178,17	95,66	-	206	-
13/04/21	477,89	256,76	106,99	-	208	-
19/04/21	498,80	580,80	221,42	-	214	-
20/04/21	471,11	658,61	280,11	8,00	215	5
21/04/21	416,80	475,04	281,53	-	216	-
23/04/21	498,57	428,08	261,59	-	218	-
25/04/21	503,41	531,77	273,23	-	220	-
27/04/21	503,76	536,20	274,36	8,40	222	15

28/04/21	963,89	56,02	221,42	8,20	223	-
30/04/21	1.010,48	64,94	-	-	225	-
02/05/21	1.029,50	84,36	-	-	227	-
04/05/21	1.023,12	139,36	-	-	229	-
09/05/21	906,41	507,61	-	-	234	-
10/05/21	1.029,74	49,74	-	4,40	235	15
11/05/21	1.042,14	48,20	-	-	236	-
12/05/21	994,09	41,48	-	2,90	237	5
13/05/21	855,51	35,75	-	2,90	238	13
14/05/21	711,42	38,65	167,58	-	239	-
15/05/21	940,86	41,65	167,77	-	240	-
16/05/21	977,75	43,46	148,43	-	241	-
18/05/21	147,85	31,67	80,49	2,90	243	15
19/05/21	158,46	87,14	33,21	-	244	-
20/05/21	284,14	91,29	34,04	-	245	-
21/05/21	56,78	39,76	15,50	2,90	246	24
22/05/21	85,53	47,04	35,70	2,40	247	-
23/05/21	91,29	55,76	16,35	-	248	-
24/05/21	396,67	74,41	15,50	-	249	-
25/05/21	454,70	81,03	15,40	-	250	-
26/05/21	488,01	87,64	15,40	-	251	-
27/05/21	509,01	97,59	15,46	-	252	-
28/05/21	542,91	114,77	15,50	-	253	-
29/05/21	575,47	146,66	15,60	-	254	-
30/05/21	658,91	214,01	15,80	-	255	-
31/05/21	695,07	274,30	16,10	-	256	-
01/06/21	705,55	334,83	15,50	-	257	-
02/06/21	727,66	385,77	-	-	258	-
03/06/21	744,95	422,40	-	-	259	-
04/06/21	773,97	460,92	-	-	260	-
05/06/21	777,19	488,12	-	-	261	-
06/06/21	717,34	481,20	-	-	262	-
07/06/21	89,25	84,03	-	1,10	263	-
08/06/21	55,79	37,22	-	-	264	-
09/06/21	58,71	38,78	-	0,90	265	18
10/06/21	75,55	45,12	-	-	266	-
11/06/21	94,96	50,35	-	-	267	-
12/06/21	154,89	55,91	-	-	268	-
13/06/21	251,32	60,20	-	-	269	-
14/06/21	429,66	68,30	-	-	270	-
15/06/21	19,97	35,05	-	-	271	-
16/06/21	-	-	-	1,40	272	-
18/06/21	-	-	-	2,80	273	-

Tabela B.5: Dados do perfil de umidade 1 - Ensaio 2.

Data	Prof. 5 cm	Prof. 15 cm	Prof. 25 cm	Prof. 35 cm	Dia	Precipitação
10/09/21	0,311	0,292	0,286	0,300	1	-
13/09/21	0,297	0,263	0,277	0,304	4	-
15/09/21	0,293	0,256	0,270	0,311	6	-
17/09/21	0,291	0,251	0,260	0,318	8	-
18/09/21	0,290	0,249	0,258	0,320	9	-
19/09/21	0,288	0,247	0,256	0,322	10	-
20/09/21	0,285	0,245	0,252	0,322	11	-
21/09/21	0,284	0,243	0,251	0,323	12	-
22/09/21	0,282	0,242	0,249	0,324	13	-
23/09/21	0,308	0,241	0,248	0,325	14	5
24/09/21	0,280	0,240	0,248	0,325	15	-
25/09/21	0,279	0,240	0,247	0,325	16	-
26/09/21	0,278	0,239	0,246	0,325	17	-
27/09/21	0,278	0,239	0,243	0,325	18	-
28/09/21	0,276	0,238	0,241	0,326	19	-
01/10/21	0,271	0,236	0,238	0,326	22	-
06/10/21	0,264	0,233	0,235	0,326	27	-
11/10/21	0,257	0,231	0,232	0,325	32	-
16/10/21	0,252	0,229	0,230	0,325	37	-
21/10/21	0,245	0,228	0,228	0,325	42	-
26/10/21	0,240	0,226	0,226	0,324	47	-
31/10/21	0,236	0,224	0,225	0,324	52	-
05/11/21	0,236	0,225	#N/DISP	0,323	57	-
10/11/21	0,228	0,221	#N/DISP	0,322	62	-
15/11/21	0,223	0,218	#N/DISP	0,321	67	-
20/11/21	0,219	0,216	0,219	0,320	72	-
25/11/21	0,216	0,215	0,217	0,320	77	-
30/11/21	0,212	0,214	0,217	0,319	82	-
05/12/21	0,208	0,213	0,213	0,318	87	-
10/12/21	0,204	0,212	0,212	0,317	92	-
15/12/21	0,200	0,210	0,211	0,316	97	-
20/12/21	0,196	0,208	0,210	0,315	102	-
25/12/21	0,191	0,207	0,208	0,315	107	-
30/12/21	0,188	0,206	0,207	0,314	112	-
05/01/22	0,184	0,204	0,206	0,313	117	-
13/01/22	0,179	0,202	0,205	0,311	125	-
18/01/22	0,176	0,201	0,203	0,310	130	-
23/01/22	0,174	0,200	0,201	0,309	135	-
24/01/22	0,311	0,202	0,203	0,310	136	15
25/01/22	0,269	0,217	0,207	0,312	137	-
26/01/22	0,261	0,221	0,209	0,313	138	-
28/01/22	0,255	0,220	0,211	0,315	140	-
02/02/22	0,243	0,218	0,212	0,316	145	-

03/02/22	0,240	0,218	0,212	0,316	146	-
04/02/22	0,275	0,219	0,212	0,316	147	5
05/02/22	0,263	0,224	0,213	0,316	148	-
06/02/22	0,255	0,225	0,214	0,316	149	-
07/02/22	0,252	0,225	0,216	0,317	150	-
08/02/22	0,250	0,225	0,217	0,318	151	-
09/02/22	0,248	0,224	0,216	0,318	152	-
10/02/22	0,245	0,224	0,217	0,318	153	-
11/02/22	0,311	0,267	0,210	0,310	154	14
12/02/22	0,290	0,266	0,254	0,311	155	-
13/02/22	0,282	0,263	0,258	0,311	156	-
14/02/22	0,270	0,257	0,257	0,313	157	-
15/02/22	0,310	0,273	0,258	0,300	158	5
16/02/22	0,290	0,269	0,264	0,303	159	-
17/02/22	0,281	0,264	0,264	0,305	160	-
22/02/22	0,296	0,247	0,259	0,312	165	14
27/02/22	0,222	0,243	0,254	0,318	170	-
04/03/22	0,186	0,240	0,249	0,322	175	-
09/03/22	0,144	0,237	0,245	0,324	180	-
14/03/22	0,122	0,234	0,242	0,325	185	-
18/03/22	0,302	0,233	0,244	0,325	189	29
19/03/22	0,267	0,244	0,249	0,324	190	-
20/03/22	0,257	0,246	0,252	0,324	191	-
21/03/22	0,248	0,241	0,250	0,325	192	-
24/03/22	0,238	0,236	0,248	0,325	195	-
29/03/22	0,232	0,231	0,247	0,325	200	-
30/03/22	0,230	0,230	0,246	0,325	201	-
31/03/22	0,228	0,230	0,245	0,325	202	-
01/04/22	0,292	0,233	0,242	0,326	203	5
02/04/22	0,260	0,238	0,245	0,326	204	-
03/04/22	0,248	0,236	0,244	0,326	205	-
04/04/22	0,257	0,236	0,248	0,326	206	14
05/04/22	0,254	0,238	0,248	0,326	207	-
06/04/22	0,247	0,239	0,249	0,326	208	-
07/04/22	0,299	0,268	0,232	0,325	209	29
08/04/22	0,270	0,267	0,258	0,324	220	-
13/04/22	0,249	0,247	0,258	0,321	225	-
18/04/22	0,241	0,240	0,257	0,323	230	-
23/04/22	0,222	0,236	0,255	0,324	235	-
28/04/22	0,198	0,231	0,252	0,324	240	-
03/05/22	0,170	0,227	0,250	0,325	245	-
08/05/22	0,142	0,228	0,246	0,325	250	-
13/05/22	0,131	0,230	0,244	0,326	255	-
18/05/22	0,123	0,229	0,242	0,326	260	-

Tabela B.6: Dados do perfil de sucção 1 - Ensaio 2.

Data	Prof. 5 cm	Prof. 15 cm	Prof. 25 cm	Prof. 35 cm	Dia	Precipitação
10/09/21	594,74	567,71	774,51	144,95	1	-
13/09/21	608,03	587,52	817,01	335,45	4	-
15/09/21	630,85	611,96	824,95	463,37	6	-
17/09/21	679,71	673,02	846,69	490,71	8	-
18/09/21	669,92	-	859,07	495,14	9	-
19/09/21	673,17	-	867,81	497,31	10	-
20/09/21	668,23	673,64	860,85	495,37	11	-
21/09/21	666,69	669,46	858,87	494,91	12	-
22/09/21	663,94	664,24	850,80	492,07	13	-
23/09/21	437,35	669,77	857,29	495,48	14	5
24/09/21	663,94	708,80	884,56	499,37	15	-
25/09/21	609,15	671,78	854,33	499,49	16	-
26/09/21	617,20	672,55	850,99	498,23	17	-
27/09/21	1.238,59	769,00	891,30	507,25	18	-
28/09/21	1.264,23	769,18	892,74	507,49	19	-
01/10/21	1.312,88	768,11	893,57	506,09	22	-
06/10/21	1.340,68	767,58	892,54	505,39	27	-
11/10/21	1.352,15	770,77	899,97	509,71	32	-
16/10/21	1.349,35	770,06	899,14	507,96	37	-
21/10/21	1.340,99	767,05	898,52	511,36	42	-
26/10/21	1.333,60	769,18	899,76	512,89	47	-
31/10/21	1.345,01	773,44	909,13	523,75	52	-
05/11/21	612,11	575,87	718,83	455,43	57	-
10/11/21	636,25	608,45	758,97	472,42	62	-
15/11/21	663,94	618,91	782,22	488,68	67	-
20/11/21	1.355,27	810,82	933,53	535,21	72	-
25/11/21	1.311,07	791,82	908,71	531,90	77	-
30/11/21	1.288,03	791,27	906,83	531,65	82	-
05/12/21	1.346,56	818,33	926,25	537,68	87	-
10/12/21	1.359,65	820,78	929,45	537,81	92	-
15/12/21	1.383,97	829,52	928,81	537,81	97	-
20/12/21	1.391,96	829,14	926,67	536,94	102	-
25/12/21	1.391,96	826,09	926,25	537,56	107	-
30/12/21	1.464,29	833,35	932,02	539,05	112	-
05/01/22	1.491,17	836,23	940,21	540,66	117	-
13/01/22	657,39	627,66	778,44	490,60	125	-
18/01/22	689,96	666,23	833,54	504,46	130	-
23/01/22	695,55	663,94	825,52	500,87	135	-
24/01/22	281,99	670,85	834,50	504,81	136	15
25/01/2022	283,16	667,92	831,05	503,88	137	-
26/01/22	313,64	675,35	834,69	506,44	138	-

28/01/22	347,00	702,63	889,87	519,79	140	-
02/02/22	488,46	661,04	837,00	504,23	145	-
03/02/22	701,98	659,06	824,00	499,37	146	-
04/02/22	48,80	392,85	854,53	501,68	147	5
05/02/22	221,83	536,69	841,25	504,23	148	-
06/02/22	284,46	620,48	836,04	502,49	149	-
07/02/22	317,19	654,52	829,14	499,60	150	-
08/02/22	369,17	658,61	821,91	498,11	151	-
09/02/22	439,06	667,92	826,28	499,49	152	-
10/02/22	1.255,24	792,91	905,37	533,49	153	-
11/02/22	14,70	40,95	936,76	527,26	154	10
12/02/22	103,45	238,58	756,18	467,44	155	-
13/02/22	256,40	307,70	731,01	453,24	156	-
14/02/22	282,57	344,13	735,23	461,88	157	-
15/02/22	36,52	58,23	743,75	465,72	158	5
16/02/22	51,38	97,53	642,58	461,77	159	-
17/02/22	82,08	147,89	589,83	455,33	160	-
22/02/22	144,49	210,97	609,99	470,57	165	10
27/02/22	356,72	379,51	642,43	468,84	170	-
04/03/22	1.210,11	651,97	853,54	448,88	175	-
09/03/22	1.221,87	770,95	898,93	520,51	180	-
14/03/22	1.195,16	783,84	897,28	401,35	185	-
18/03/22	32,65	42,05	551,22	514,90	189	29
19/03/22	47,15	91,14	410,13	511,71	190	-
20/03/22	57,48	130,47	371,04	508,66	191	-
21/03/22	189,07	208,56	503,99	505,74	192	-
24/03/22	297,60	303,76	523,87	503,88	195	-
29/03/22	1.188,30	578,26	723,65	502,49	200	-
30/03/22	1.191,04	613,80	749,59	496,39	201	-
31/03/22	1.195,44	646,88	760,20	454,07	202	-
01/04/22	12,93	15,69	777,73	420,85	203	5
02/04/22	53,29	65,50	582,67	397,67	204	-
03/04/22	330,39	95,15	598,59	381,97	205	-
04/04/22	12,60	15,78	539,17	375,17	206	10
05/04/22	50,47	45,23	435,94	368,49	207	-
06/04/22	170,19	67,07	400,34	376,29	208	-
07/04/22	11,99	15,30	301,60	370,28	209	29
08/04/22	40,07	21,72	172,75	367,05	220	-
13/04/22	799,33	131,80	219,55	388,98	225	-
18/04/22	1.055,67	226,84	264,38	418,14	230	-
23/04/22	1.147,43	353,86	342,71	443,64	235	-
28/04/22	481,87	323,17	418,24	467,33	240	-
03/05/22	1.071,09	500,99	518,00	476,79	245	-
08/05/22	1.065,43	571,25	583,88	475,04	250	-
13/05/22	1.070,35	612,11	637,86	-	255	-

18/05/22	1.081,75	658,00	669,62	-	260	-
----------	----------	--------	--------	---	-----	---

Tabela B.7: Dados do perfil de umidade 2 - Ensaio 2.

Data	Prof. 5 cm	Prof. 15 cm	Prof. 25 cm	Prof. 35 cm	Dia	Precipitação
10/09/21	0,299	0,299	0,301	0,320	1	-
13/09/21	0,297	0,297	0,300	0,318	4	-
15/09/21	0,293	0,296	0,296	0,319	6	-
17/09/21	0,291	0,289	0,291	0,317	8	-
18/09/21	0,289	0,286	0,287	0,316	9	-
19/09/21	0,285	0,282	#N/DISP	0,316	10	-
20/09/21	0,283	0,281	0,282	0,315	11	-
21/09/21	0,280	0,278	0,280	0,314	12	-
22/09/21	0,276	0,276	0,277	0,313	13	-
23/09/21	0,273	0,274	0,276	0,312	14	5
24/09/21	0,287	0,273	0,275	0,312	15	-
25/09/21	0,274	0,274	0,276	0,312	16	-
26/09/21	0,273	0,274	0,276	0,312	17	-
27/09/21	0,274	0,274	0,275	0,312	18	-
28/09/21	0,272	0,273	0,275	0,312	19	-
01/10/21	0,268	0,271	0,273	0,311	22	-
06/10/21	0,258	0,267	0,268	0,310	27	-
11/10/21	0,247	0,262	0,265	0,308	32	-
16/10/21	0,238	0,258	0,263	0,305	37	-
21/10/21	0,231	0,255	0,261	0,303	42	-
26/10/21	0,224	0,252	0,259	0,301	47	-
31/10/21	0,218	0,248	0,257	0,298	52	-
05/11/21	0,219	0,245	0,253	0,294	57	-
10/11/21	0,212	0,243	0,251	0,291	62	-
15/11/21	0,207	0,241	0,250	0,290	67	-
20/11/21	0,196	0,237	0,248	0,288	72	-
25/11/21	0,193	0,235	0,248	0,287	77	-
30/11/21	0,188	0,232	0,246	0,283	82	-
05/12/21	0,183	0,229	0,246	0,281	87	-
10/12/21	0,180	0,228	0,244	0,279	92	-
15/12/21	0,176	0,226	0,243	0,278	97	-
20/12/21	0,174	0,224	0,242	0,276	102	-
25/12/21	0,173	0,224	0,240	0,275	107	-
30/12/21	0,169	0,222	0,240	0,274	112	-
05/01/22	0,185	0,228	0,240	0,275	117	-
13/01/22	0,183	0,226	0,240	0,273	125	-
18/01/22	0,181	0,225	0,239	0,272	130	-

23/01/22	0,199	0,226	0,239	0,273	135	-
24/01/22	0,299	0,226	0,238	0,272	136	15
25/01/22	0,267	0,226	0,238	0,272	137	-
26/01/22	0,254	0,226	0,239	0,272	138	-
28/01/22	0,240	0,226	0,239	0,272	140	-
02/02/22	0,205	0,223	0,237	0,270	145	-
03/02/22	0,190	0,224	0,240	0,270	146	-
04/02/22	0,282	0,225	0,239	0,270	147	5
05/02/22	0,259	0,226	0,238	0,271	148	-
06/02/22	0,236	0,227	0,237	0,271	149	-
07/02/22	0,201	0,227	0,234	0,271	150	-
08/02/22	0,181	0,220	0,235	0,269	151	-
09/02/22	0,183	0,217	0,238	0,269	152	-
10/02/22	0,213	0,229	0,240	0,275	153	-
11/02/22	0,276	0,231	0,241	0,277	154	14
12/02/22	0,209	0,233	0,241	0,278	155	-
13/02/22	0,265	0,231	0,251	0,277	156	-
14/02/22	0,260	0,236	0,252	0,279	157	-
15/02/22	0,280	0,240	0,253	0,281	158	5
16/02/22	0,255	0,240	0,253	0,281	159	-
17/02/22	0,251	0,242	0,253	0,282	160	-
22/02/22	0,303	0,238	0,253	0,283	165	14
27/02/22	0,284	0,232	0,251	0,280	170	-
04/03/22	0,266	0,231	0,250	0,279	175	-
09/03/22	0,219	0,231	0,246	0,278	180	-
14/03/22	0,193	0,229	0,244	0,277	185	-
18/03/22	0,385	0,252	0,264	0,290	189	29
19/03/22	0,261	0,273	0,261	0,296	190	-
20/03/22	0,250	0,282	0,258	0,302	191	-
21/03/22	0,245	0,283	0,258	0,304	192	-
24/03/22	0,239	0,273	0,258	0,301	195	-
29/03/22	0,233	0,270	0,258	0,300	200	-
30/03/22	0,227	0,266	0,257	0,301	201	-
31/03/22	0,202	0,255	0,257	0,297	202	-
01/04/22	0,356	0,253	0,253	0,298	203	5
02/04/22	0,252	0,266	0,257	0,301	204	-
03/04/22	0,221	0,267	0,257	0,303	205	-
04/04/22	0,332	0,263	0,289	0,305	206	14
05/04/22	0,257	0,283	0,296	0,308	207	-
06/04/22	0,232	0,290	0,296	0,310	208	-
07/04/22	0,334	0,292	0,365	0,311	209	29
08/04/22	0,271	0,315	0,347	0,311	220	-
13/04/22	0,242	0,318	0,341	0,315	225	-
18/04/22	0,232	0,315	0,337	0,316	230	-
23/04/22	0,221	0,308	0,328	0,316	235	-

28/04/22	0,210	0,298	0,317	0,316	240	-
03/05/22	0,203	0,292	0,309	0,316	245	-
08/05/22	0,199	0,287	0,306	0,315	250	-
13/05/22	0,195	0,283	0,302	0,315	255	-
18/05/22	0,192	0,281	0,298	0,315	260	-

Tabela B.8: Dados do perfil de sucção 2 - Ensaio 2.

Data	Prof. 5 cm	Prof. 15 cm	Prof. 25 cm	Prof. 35 cm	Dia	Precipitação
10/09/21	-	276,84	599,41	114,95	1	-
13/09/21	-	499,83	641,54	235,45	4	-
15/09/21	-	612,11	727,15	363,37	6	-
17/09/21	1.543,92	625,50	1.077,52	443,94	8	-
18/09/21	1.531,88	627,37	1.087,74	451,68	9	-
19/09/21	1.524,85	633,03	1.097,81	445,99	10	-
20/09/21	1.520,99	632,74	1.097,55	444,86	11	-
21/09/21	1.510,52	640,07	1.103,38	444,25	12	-
22/09/21	1.498,05	635,95	1.100,08	443,33	13	-
23/09/21	1.495,98	636,69	1.095,03	442,51	14	5
24/09/21	1.509,82	674,41	1.119,25	444,15	15	-
25/09/21	1.345,94	659,97	1.155,38	452,82	16	-
26/09/21	1.504,96	625,35	1.145,58	455,12	17	-
27/09/21	1.493,57	639,04	1.119,25	450,64	18	-
28/09/21	1.480,90	638,45	1.118,47	450,33	19	-
01/10/21	1.494,26	640,07	1.115,39	448,57	22	-
06/10/21	1.567,93	644,65	1.121,83	446,09	27	-
11/10/21	1.642,96	661,95	1.139,79	445,27	32	-
16/10/21	1.632,02	665,31	1.146,90	444,56	37	-
21/10/21	1.625,65	668,08	1.155,12	442,21	42	-
26/10/21	1.607,04	673,33	1.167,15	442,21	47	-
31/10/21	1.622,28	693,79	1.197,09	444,35	52	-
05/11/21	785,10	717,34	970,57	397,31	57	-
10/11/21	817,57	725,15	1.036,64	413,26	62	-
15/11/21	844,75	729,67	1.077,03	417,95	67	-
20/11/21	1.679,68	731,01	1.230,63	453,24	72	-
25/11/21	1.626,40	722,65	1.216,54	445,07	77	-
30/11/21	1.610,00	723,15	1.210,95	444,15	82	-
05/12/21	1.694,05	726,99	1.225,82	449,29	87	-
10/12/21	1.701,09	737,61	1.223,56	450,43	92	-
15/12/21	1.682,00	734,90	1.206,77	446,30	97	-
20/12/21	1.680,84	734,22	1.195,99	445,27	102	-
25/12/21	1.698,35	738,63	1.199,30	444,35	107	-

30/12/21	1.698,35	734,73	1.191,86	446,20	112	-
05/01/22	1.718,41	746,15	1.199,57	445,99	117	-
13/01/22	1.698,36	616,35	1.054,21	416,61	125	-
18/01/22	1.718,09	612,95	1.102,37	425,82	130	-
23/01/22	874,63	613,94	1.079,01	420,66	135	-
24/01/22	410,65	615,07	1.093,02	423,77	136	15
25/01/22	699,14	614,36	1.094,53	424,55	137	-
26/01/22	890,69	615,64	1.098,31	424,25	138	-
28/01/22	952,85	620,91	1.171,46	437,45	140	-
02/02/22	912,49	614,65	1.110,01	429,36	145	-
03/02/22	895,62	613,66	1.097,81	424,06	146	-
04/02/22	120,65	612,53	1.086,24	423,28	147	5
05/02/22	306,09	609,71	1.076,03	421,72	148	-
06/02/22	675,24	611,26	1.075,04	421,33	149	-
07/02/22	882,52	630,12	1.079,26	421,82	150	-
08/02/22	870,82	619,91	1.117,19	428,48	151	-
09/02/22	864,62	617,20	1.118,22	430,95	152	-
10/02/22	869,61	614,65	1.108,73	428,57	153	-
11/02/22	371,59	609,43	1.100,84	426,11	154	14
12/02/22	865,42	612,67	1.089,00	423,57	155	-
13/02/22	876,04	730,01	1.096,80	425,53	156	-
14/02/22	1.615,94	791,45	1.185,29	448,05	157	-
15/02/22	320,65	570,46	1.208,44	451,26	158	5
16/02/22	451,68	546,04	1.004,91	412,03	159	-
17/02/22	480,87	552,87	969,45	401,26	160	-
22/02/22	506,09	568,36	1.026,90	418,14	165	14
27/02/22	866,22	630,41	1.035,44	416,70	170	-
04/03/22	1.625,65	726,82	1.207,89	452,09	175	-
09/03/22	1.567,21	727,15	1.204,55	449,39	180	-
14/03/22	1.498,74	722,98	1.177,68	445,68	185	-
18/03/22	255,23	314,43	798,04	356,72	189	29
19/03/22	311,12	313,49	681,59	330,09	190	-
20/03/22	316,39	454,81	646,88	324,66	191	-
21/03/22	433,94	488,23	884,97	388,98	192	-
24/03/22	542,53	638,74	979,10	404,69	195	-
29/03/22	1.442,53	651,22	1.096,04	440,38	200	-
30/03/22	1.448,53	656,18	1.111,80	441,90	201	-
31/03/22	1.445,19	564,06	1.111,80	441,70	202	-
01/04/22	166,12	219,39	1.133,25	443,02	203	5
02/04/22	380,39	356,06	981,81	416,80	204	-
03/04/22	885,78	57,68	1.089,00	438,36	205	-
04/04/22	129,34	49,71	981,36	18,63	206	14
05/04/22	309,05	120,32	469,17	118,61	207	-
06/04/22	657,70	13,30	463,26	175,92	208	-
07/04/22	101,84	19,29	22,04	13,10	209	29

08/04/22	195,76	32,39	19,83	17,47	220	-
13/04/22	918,60	233,41	49,79	46,20	225	-
18/04/22	997,07	294,87	83,24	60,75	230	-
23/04/22	1.049,61	398,31	154,50	80,90	235	-
28/04/22	1.069,61	443,94	260,99	121,91	240	-
03/05/22	1.091,76	494,91	346,04	214,01	245	-
08/05/22	1.110,52	538,80	434,44	280,69	250	-
13/05/22	1.138,48	578,66	511,48	317,05	255	-
18/05/22	1.148,75	606,77	559,92	339,57	260	-